МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**А.М. СУГРОБОВ, А.В. БЕРИЛОВ, С.А. ГРУЗКОВ,
И.В. СТАНКЕВИЧ**

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ

Учебное пособие
по курсам
«Электрооборудование автомобилей и тракторов»
и «Проектирование электрооборудования
автомобилей и тракторов»
для студентов, обучающихся по направлению
140600 «Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»

Москва Издательский дом МЭИ 2011

УДК 621.314
С 891

Утверждено учебным управлением МЭИ (ТУ)
в качестве учебного пособия для студентов
Подготовлено на кафедре электротехнических комплексов
автономных объектов

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор Ю.А. Купеев,
канд. техн. наук, профессор В.И. Нагайцев

Сугробов А.М.

С 891 Системы электроснабжения и электрозапуска двигателей автомобилей и тракторов: учебное пособие / А.М. Сугробов, А.В. Берилов, С.А. Грузков, И.В. Станкевич. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 96 с.

ISBN 978-5-383-00637-5

Рассмотрены основные понятия и определения, принципы построения и типовые структуры систем электроснабжения и электростартерного пуска автомобилей и тракторов; сформулированы критерии выбора магнитных систем электрических машин автотракторного назначения и примеры их практической реализации; приведены рабочие характеристики и конструкции современных автотракторных генераторов и стартерных электродвигателей и электрические схемы систем регулирования их выходных параметров.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

ISBN 978-5-383-00637-5

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данном учебном пособии в ограниченном, но достаточном для восприятия студентами объёме изложены основные вопросы, связанные с построением систем электроснабжения и электрического пуска двигателей внутреннего сгорания автомобилей и тракторов, предъявляемыми к ним требованиями и средствами их реализации, устройством и особенностями работы основных элементов этих систем (электромашинных генераторов и стартерных электродвигателей), их рабочими характеристиками и выраженными в аналитическом или графическом виде зависимостями между их электромагнитными параметрами и размерами.

Рассмотрены также вопросы, связанные с обеспечением требуемого качества электроэнергии в системах электроснабжения и эксплуатационных качеств систем электрического пуска двигателей.

При написании пособия использованы как информационные материалы, содержащиеся в общедоступной литературе (в основном графические материалы), так и результаты научной работы авторов.

В пособии наряду с традиционно используемыми в автотракторных системах электроснабжения конструкциями генераторов и регуляторов напряжения рассмотрены перспективные их исполнения в виде индукторных генераторов и многофункциональных регуляторов напряжения.

Пользуясь пособием, студенты, обучающиеся по направлению «Энергетика и электротехника» и специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов» могут получить достаточный уровень теоретической подготовки для успешного освоения лекционного курса «Электрооборудование автомобилей и тракторов», выполнения лабораторных работ по этому курсу и расчётных заданий. Пособие предназначено также для студентов, обучающихся по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов».

Первая глава пособия написана А.М. Сугробовым, А.В. Бериловым и С.А. Грузковым, вторая глава А.М. Сугробовым, С.А. Грузковым и И.В. Станкевичем.

Авторы выражают глубокую признательность заведующему кафедрой «Электротехнические комплексы автономных объектов (ЭКАО) МЭИ (ТУ) профессору С.И. Маслову и рецензентам — профессорам В.И. Нагайцеву и Ю.А. Купееву за оказанную ими помощь при подготовке и выпуске пособия.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

1.1. Принципы построения и работы систем электроснабжения автомобилей

Система электроснабжения (СЭС) автомобиля представляет собой совокупность двух функционально и электрически связанных между собой систем: системы генерирования электроэнергии (СГЭ) и системы распределения электроэнергии (СРЭ). В состав системы генерирования электроэнергии входят источники и преобразователи электроэнергии, устройства защиты, контроля и обеспечения требуемого качества электроэнергии, а в состав системы распределения электроэнергии — распределительные устройства, провода, коммутационная аппаратура и аппаратура защиты сети.

В технике электроснабжения транспортных средств систему генерирования электроэнергии называют, как правило, тождественными ей по содержанию словосочетаниями, а именно: генераторной установкой (ГУ) или электроэнергетической установкой. Применительно к СЭС автомобилей чаще других встречается определение СГЭ как генераторной установки автомобиля. Системы электроснабжения автомобилей относятся к категории систем постоянного тока низкого напряжения.

В соответствии с действующими нормативными документами на качество электроэнергии (ГОСТ 3940—84) напряжение в точках подключения измерительных элементов в них при всех возможных сочетаниях подключённых к сети потребителей электроэнергии и всех режимах работы двигателя не должно выходить за пределы 14 или 28 В, а на самих потребителях оно должно находиться на уровне соответственно 12 или 14 В. На автомобилях с дизельными двигателями могут применяться генераторные установки на два уровня напряжения — 14/28 В. Напряжение 28 В используется для зарядки аккумуляторной батареи (АБ), работающей при пуске двигателя. Для его получения в генераторную установку вводится электронный удвоитель напряжения или трасформаторно-выпрямительный блок. Регуляторы напряжения в установках на два уровня напряжения обеспечивают постоянство только первого уровня напряжения 14 В.

На рис. 1.1 приведена принципиальная электрическая схема одной из наиболее широко используемых на современных автомобилях ге-

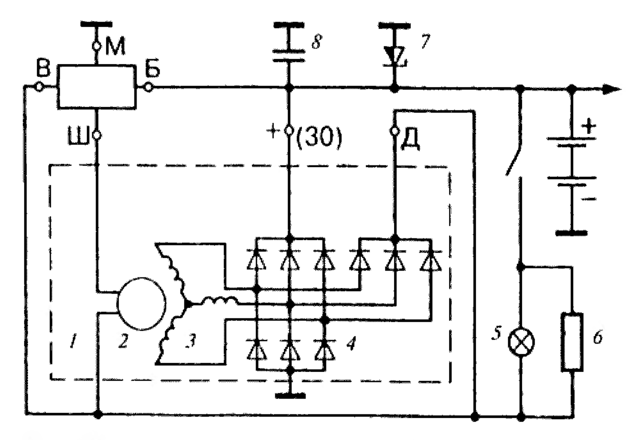


Рис. 1.1. Электрическая схема генераторной установки

нераторных установок. В этой схеме предусмотрено питание обмотки возбуждения от дополнительного трёхфазного двухполупериодного выпрямителя, образованного тремя диодами основного выпрямительного моста и тремя дополнительными диодами, с подключёнными к выводу «Д» катодами. В схеме возможен некоторый разряд АБ малыми токами по цепи регулятора напряжения, поэтому при длительной стоянке автомобиля желательно отсоединять сетевой провод от клеммы «+» аккумуляторной батареи.

Ввиду того, что в вентильных генераторах параллельного возбуждения с относительно большим сопротивлением цепи возбуждения, включающей в себя помимо обмотки возбуждения два последовательно включённых с ней диода, отсутствуют условия, обеспечивающие возникновение процесса самовозбуждения генераторов (достаточный для этого уровень остаточной намагниченности стали магнитопровода), в схеме предусмотрено принудительное питание обмотки возбуждения от вспомогательного источника. В рассматриваемой схеме его функции выполняет аккумуляторная батарея. Ток, поступающий в обмотку возбуждения через лампу *5*, достаточен для стимулирования процесса самовозбуждения генератора и в то же время ввиду малой величины не оказывает существенного влияния на разряд АБ. Лампа *5* помимо функции ограничения тока возбуждения выполняет функцию контроля работоспособности генераторной установки. Свечение её при неработающем двигателе внутреннего сгорания указывает на исправное состояние цепи возбуждения генератора *2* и *3*. При работающем двигателе напряжения на выводах генератора

«Д» и «+» практически равны, поэтому лампа не горит. Если генераторная установка *1* при работающем двигателе автомобиля не развивает напряжения, то лампа *5* своим свечением известит водителя о неисправности генераторной установки или обрыве приводного ремня.

Резистор *6* введён в схему генераторной установки для того, чтобы обеспечить процесс самовозбуждения генератора в случае выхода из строя контрольной лампы. Для устранения негативного влияния всплесков напряжения на работу электронной аппаратуры в электрическую схему установки введены стабилитрон *7* и конденсатор *9*.

Основным источником электроэнергии на всех марках современных автомобилей являются электрические генераторы переменного тока. Вырабатываемая ими электроэнергия поступает к потребителям через выпрямительные устройства. Наиболее целесообразным вариантом исполнения последних считается трёхфазная двухполупериодная схема Ларионова *4*. Согласование уровней напряжений на входе и выходе выпрямительного моста и мощностей переменного и постоянного тока обеспечивается на стадии проектирования генераторов с учётом особенностей конкретной (выбранной) схемы выпрямления.

Особенностью СЭС автономных (не связанных с централизованными электрическими сетями) объектов, в том числе СЭС всех видов автомобильного транспорта, тракторов, танков и т.д. является обязательное присутствие в них накопителей электроэнергии в виде аккумуляторных батарей.

Характер взаимодействия АБ с генератором зависит от режимов работы основной силовой установки (в данном случае от режима работы автомобильного двигателя), а также от взаимного расположения внешних характеристик генератора и АБ. При неработающем двигателе и пребыванием его в режиме пуска АБ работает фактически автономно от генератора, обеспечивая электроэнергией все функционирующие в этих режимах приёмники (потребители) электроэнергии.

При работе СЭ автомобиля в режиме максимальной нагрузки (в ночное время, зимой) АБ работает параллельно с генератором, выполняя функцию своеобразной защиты его от перегрузок. Помимо этого присутствие АБ в системе приводит к сглаживанию пульсаций напряжения на нагрузке и обеспечивает надёжное возбуждение генератора. Во всех других случаях АБ находится в режиме накопления энергии (в режиме заряда). Характер взаимодействия генератора и АБ можно проследить, обратившись к рис. 1.2, *а*, *б*, на котором качественно воспроизведены внешние характеристики вентильного гене-

ратора $U_Г(I_Г)$ и батареи $U_Б(I_Б)$ (рис. 1.2, *а*), а также зависимости токов этих источников $I_Г$ и $I_Б$ от тока в нагрузке $I_Н$ (рис. 1.2, *б*) при параллельном подключении их к нагрузке.

Участок *1—4* характеристики $U_Г(I_Г)$ соответствует работе АБ в режиме подзарядки. Потребляемый ею ток зависит от суммарной мощности включённых приёмников электроэнергии или (что то же самое) от положения рабочей точки на внешней характеристике генератора. При отсутствии нагрузки (точка *1*) вся вырабатываемая генератором электроэнергия идёт на заряд аккумуляторной батареи ($I_Г = I_Б$). При увеличении нагрузки вплоть до тока $I_{Н2}$, соответствующего крайней точке регулируемого участка внешней характеристики генератора, величина зарядного тока $I_{Бз}$ не претерпевает изменений. При выходе рабочей точки за пределы регулируемого участка (точки *3*, *4*) возрастание тока нагрузки $I_Н$ сопровождается уменьшением зарядного тока $I_{Бз}$ вплоть до нуля (точка *4*). При дальнейшем снижении рабочей точки на нерегулируемой части внешней характеристики генератора АБ работает в режиме разряда, отдавая часть аккумулированной в ней энергии в нагрузку.

В процессе эксплуатации автомобиля возможны различного рода неисправности, в результате которых система электроснабжения переходит в нештатный для неё режим работы, проявляющийся в ограничении функциональных её возможностей. При выходе из строя аккумуляторной батареи генераторная установка теряет способность возобновления работы после останова двигателя, а в период работы сразу после выхода из строя АБ до останова двигателя она не способна обеспечить постоянство напряжения на потребителях при всех возможных в этот период вариантах их совместного подключения к одиночно работающему генератору. При выходе из строя генератора ресурс работы системы электроснабжения резко сокращается, так как в этом случае он всецело определяется энергетическими возможностями аккумуляторной батареи (её ёмкостью).

Столь же неблагоприятными с точки зрения нежелательных последствий для системы электроснабжения являются неисправности регулятора напряжения. Результаты их могут проявиться либо в образовании короткозамкнутой цепочки между выводами «Ш» и «М», шунтирующей регулятор напряжения и напрямую замыкающей цепь питания обмотки возбуждения на массу, либо, наоборот, разрыве электрической связи между этими выводами. В первом случае генератор переходит на работу по своим естественным внешним характери-

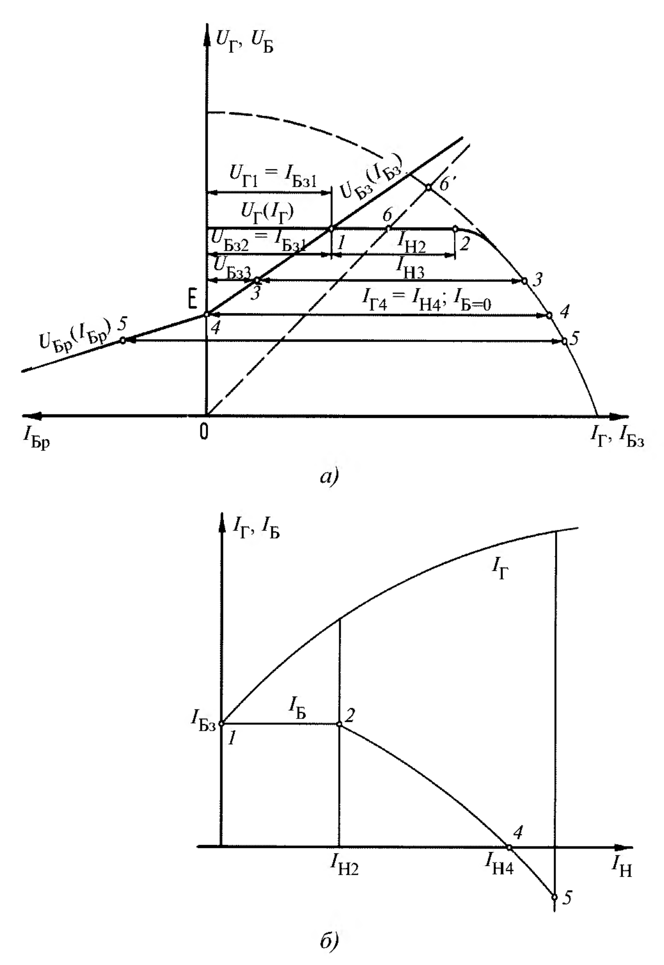


Рис. 1.2. Распределение нагрузок между генератором и аккумуляторной батареей: *а* — внешние характеристики источников; *б* — кривые распределения нагрузок в функции тока нагрузки

стикам, и уровень напряжения в системе всецело зависит от суммарного сопротивления функционирующих на момент возникновения аварийной ситуации потребителей электроэнергии. При небольших нагрузках (небольшой мощности подключённых к сети приёмников электроэнергии) установившееся значение напряжения на последних может значительно превысить номинальное напряжение, что в конеч-

ном счёте может привести к значительному увеличению зарядного тока через АБ и, как следствие, к выходу её из строя. При значительных нагрузках напряжение в сети, напротив, существенно уменьшается до уровня, недопустимого с точки зрения нормального функционирования потребителей. Для получения более наглядных представлений по этому вопросу можно обратиться к рис. 1.2, *а*. Пунктирной линией на нём отмечена та часть естественной внешней характеристики генератора, на которую перемещается точка *6* при неисправности регулятора напряжения. При отсутствии нагрузки она занимает положение точки *6'* а после подключения нагрузки смещается вправо, занимая по мере уменьшения сопротивления нагрузки положение точек *3*, *4* и т.д.

Во втором случае цепь обмотки возбуждения генератора разорвана, его напряжение равно нулю и все потребители получают питание от АБ.

Таким образом, обеспечить высокий уровень надёжности СЭС можно лишь применением в них высоконадёжных генераторов, аккумуляторных батарей и регуляторов напряжения. Естественно, что при этом перечисленные элементы должны в полной мере удовлетворять и всем другим требованиям, предъявляемым к автотракторному электрооборудованию, главными из которых являются минимум массы и габаритов и высокий уровень энергетических показателей.

1.2. Электрические генераторы. Устройство, рабочие характеристики

В настоящее время в СЭС отечественных и зарубежных автомобилей в качестве основных источников электроэнергии используются синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением. Применение генераторов переменного тока с полным или частичным выпрямлением мощности полупроводниковыми устройствами, а не генераторов постоянного тока традиционного исполнения обусловлено следующими факторами:

- отсутствием у них громоздкого, дорогостоящего, чувствительного к механическим и электрическим перегрузкам и поэтому ненадёжного в условиях работы автомобильного оборудования щёточно-коллекторного узла;
- меньшим примерно в 2,5 раза расходом меди при изготовлении на одни и те же условия применения и меньшей общей массой генератора;

- возможностью выполнения на большую мощность при относительно малых частотах вращения привода и, как следствие, способностью гарантированного обеспечения электроэнергией непрерывно увеличивающегося числа потребителей на автомобилях при прочно утвердившейся тенденции на увеличение времени их работы при частотах вращения двигателя, близких к оборотам холостого хода;
- уменьшением эксплуатационных затрат в связи с большей надёжностью;
- упрощением электрической схемы генераторной установки за счёт исключения из неё реле обратного тока.

1.2.1. Синхронные генераторы с когтеобразными индукторами

Начиная с 40-х годов прошлого столетия по настоящее время, практически монопольные позиции в СЭС автомобилей занимают генераторы с когтеобразными полюсами. Эти электрические машины допускают глубокое регулирование потокосцепления обмоток якоря обычными легко реализуемыми способами и обеспечивают за счёт этого возможность стабилизации напряжения на требуемом уровне в широком диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения двигателя. К основным факторам, предопределившим преимущественное применение именно этих генераторов в автотракторных СЭС, относятся также простота и технологичность конструкции, меньший расход меди на обмотку возбуждения и меньшие потери в ней по сравнению с генераторами с радиальным потоком, у которых для создания того же количества полюсов необходимо вписать в конструкцию индуктора в $2p$ раз большее количество катушек, каждая пара которых должна обеспечить в зазоре такую же МДС, которую развивает в нём обмотка когтеобразного индуктора (p — число пар полюсов).

Недостатками генераторов с когтеобразными полюсами являются значительные поля рассеяния индуктора, относительно большая протяжённость пути прохождения магнитного потока в нём, наличие скользящих контактов и крайне ненадёжное самовозбуждение при отсутствии в системе аккумуляторной батареи. Каждый из перечисленных недостатков имеет существенное значение при выборе магнитной системы генератора для автотракторных СЭС и свидетельствует не в пользу выбора для применения в них генераторов с когтеобразными роторами. В совокупности же эти недостатки образуют достаточно аргументированную основу для поиска других (альтерна-

тивных) вариантов исполнения электромашинных преобразователей для автомобильных СЭС.

Наряду с генераторами с когтеобразными полюсами на использование вполне обосновано могут претендовать хорошо зарекомендовавшие себя в СЭС тракторов и пока в ограниченных масштабах внедряемые в СЭС автомобилей индукторные генераторы, а также и другие типы бесконтактных электрических машин. Не исключена возможность применения в перспективе и генераторов с возбуждением от постоянных магнитов.

Все генераторы с когтеобразными полюсами, выпускаемые отечественной промышленностью и зарубежными фирмами, характеризуются практически одинаковым конструктивным оформлением их индукторов (роторов), которые незначительно отличаются друг от друга лишь геометрией полюсной системы. Что же касается якорей (статоров) этих машин, то они идентичны по устройству и выполняются либо с полностью открытыми пазами с размещёнными в них катушечными группами обмотки якоря, либо с полузакрытыми пазами с распределёнными по ним секциями той же обмотки. Принципиальные конструктивные изменения наблюдаются лишь в устройстве и размещении в конструкции генераторов элементов системы их охлаждения. В настоящее время все отечественные генераторы, устанавливаемые на автомобили и тракторы, охлаждаются воздухом, принудительно прогоняемым через внутренние его полости установленными на валу вентиляторами. На зарубежные автомобили наряду с генераторами, оснащёнными традиционной воздушной системой охлаждения, в массовом порядке устанавливаются генераторы с более эффективной жидкостной системой охлаждения.

На рис. 1.3 и 1.4 показано устройство двух автомобильных генераторов с когтеобразным индуктором. Один из них (рис. 1.3) охлаждается потоком воздуха от одного установленного за пределами корпуса вентилятором (он закреплён на шкиве). Особенностью второго генератора, получившего название «генератор компактной конструкции», является усиленная система охлаждения наиболее нагруженных в тепловом отношении элементов конструкции (обмоток якоря и возбуждения и выпрямительного блока). Теплосъём с них обеспечивается воздухом, всасываемым во внутренние полости генератора через отверстия в крышках двумя расположенными с обеих сторон индуктора под лобовыми частями обмотки якоря вентиляторами и выбра-

сываемым ими же в специально предусмотренные для этого отвер-
с т и я в

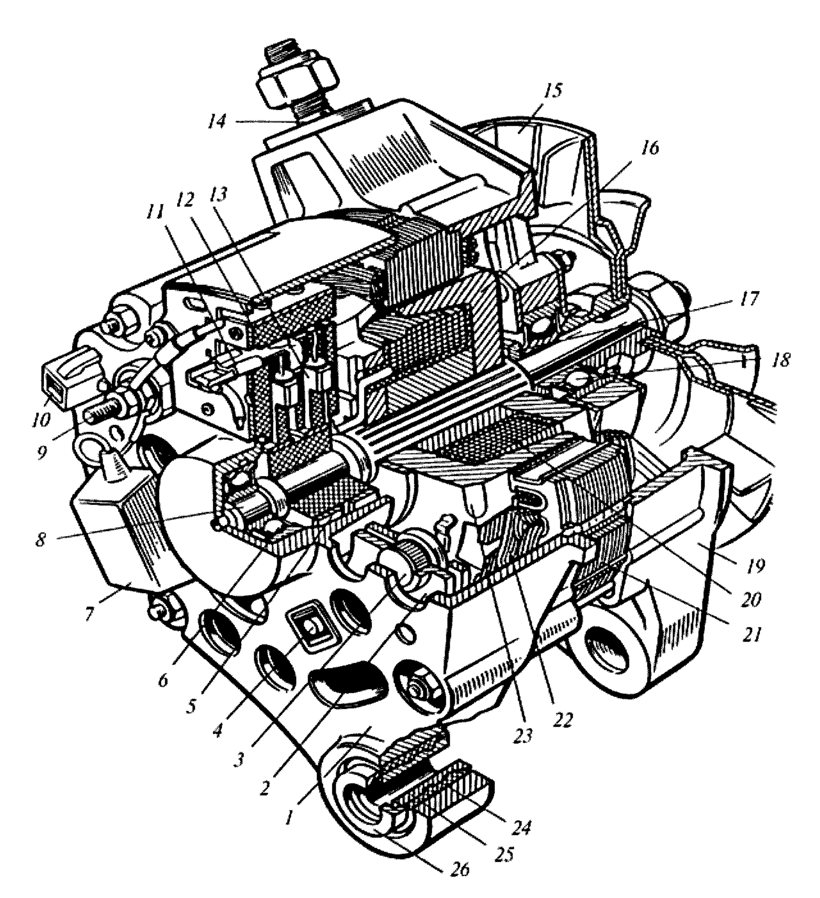


Рис. 1.3. Генератор 37.3701:

1 — крышка со стороны контактных колец; *2* — выпрямительный блок; *3* — вентиль (диод) выпрямительного блока; *4* — винт крепления выпрямительного блока; *5* — контактное кольцо; *6* — задний шарикоподшипник; *7* — конденсатор; *8* — вал ротора; *9* — вывод «30» генератора; *10* — вывод «61» генератора; *11* — вывод регулятора напряжения; *12* — регулятор напряжения; *13* — щетка; *14* — шпилька крепления генератора к натяжной планке; *15* — шкив с вентилятором; *16*, *23* — полюсный наконечник ротора; *17* — дистанционная втулка; *18* — передний шарикоподшипник; *19* — крышка со стороны привода; *20* — обмотка ротора; *21* — статор; *22* — обмотка статора; *24* — буферная втулка; *25* — втулка; *26* — подвижная втулка

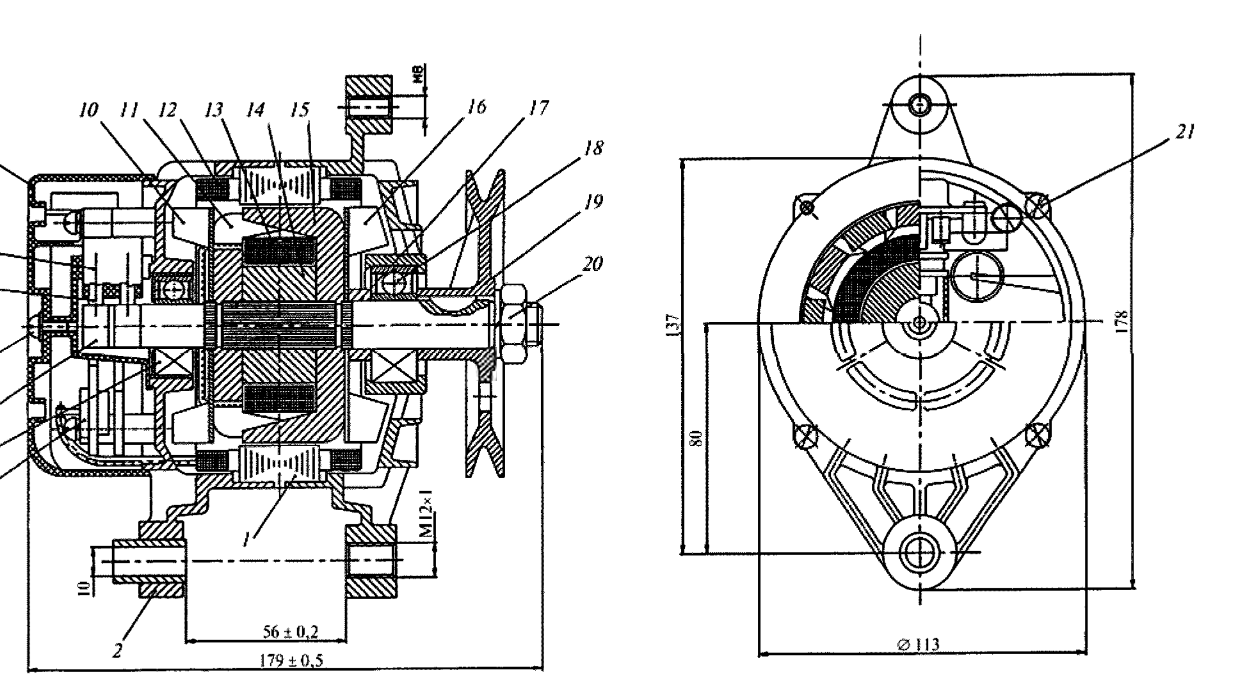


Рис. 1.4. Генератор компактной конструкции:
1 — пакет статора; *2* — задняя крышка; *3* — выпрямительный блок; *4*, *18* — подшипники; *5* — контактные кольца; *6* — винт крепления; *7* — щётки; *8* — щёткодержатель; *9* — крышка регулятора; *10*, *16* — вентиляторы; *11*, *15* — когтеобразные полюсные системы; *12* — обмотка якоря; *13* — обмотка возбуждения; *14* — втулка из магнитного материала; *17* — распорная втулка; *19* — шкив; *20* — гайка шкива; *21* — стяжные винты

корпусе. Применение более эффективной системы охлаждения обеспечивает возможность реализации в генераторах компактной конструкции больших значений электромагнитных нагрузок и позволяет за счёт этого уменьшить их габариты и расход активных материалов на изготовление.

Выпрямительные блоки и щёточно-контактные узлы расположены во внутренних полостях генераторов. Причём в генераторе 37.3701 щёточный узел встроен в регулятор напряжения, а в генераторе компактной конструкции, наоборот, регулятор напряжения закреплён на щёточно-контактном узле.

Более подробные сведения о конструкциях автомобильных генераторов с когтеобразными полюсами можно получить, ознакомившись с [1, 2, 3] и другими источниками.

1.2.2. Индукторные генераторы

На рис. 1.5 показана конструкция промышленного образца автомобильного генератора индукторного типа. От генераторов с когтеобразным индуктором он отличается устройством активной части, а также тем, что корпус, крышки и вал в нём являются не только конструктивными элементами, обеспечивающими механически устойчивую ориентацию индуктора относительно якоря и крепление генератора к приводу, но и элементами магнитной цепи, обеспечивающими поступление магнитного потока обмотки возбуждения в активную зону (рис. 1.6).

В соответствии с общепринятой классификацией электрических машин индукторные генераторы относятся к классу синхронных машин с пульсирующим потоком. Принципиальным отличительным признаком, послужившим основанием для выделения их в отдельную классификационную группу, явилось присутствие в кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре $B\delta(x)$ (рис. 1.7) постоянной составляющей Bδ-0. Магнитный поток от этой составляющей магнитной индукции замыкается по тому же контуру, что и поток от переменной составляющей магнитной индукции, однако в процессе преобразования энергии он не участвует, так как не создаёт в обмотке якоря ЭДС. Соотношение между постоянной и переменной составляющими магнитного потока зависит от геометрии (конфигурации) межзубцового пространства в генераторе, а также от характера и величины нагрузки.

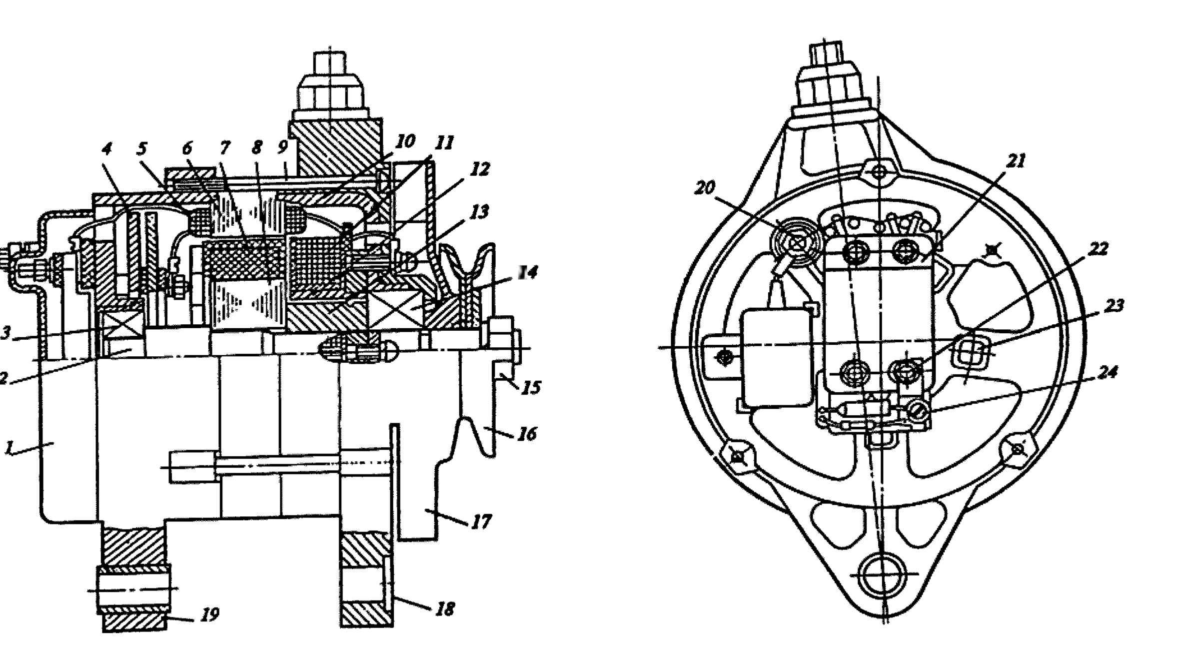


Рис. 1..5. Бесщёточный генератор 955.3701:
1 — кожух; *2* — вал ротора; *3*, *14* — шарикоподшипники; *4* — выпрямитель; *5* — обмотки статора; *6* — сердечник статора; *7* — узел постоянных магнитов; *8* — звездочка ротора; *9* — стяжные винты; *10* — передняя крышка магнитопровод; *11* — обмотка возбуждения; *12* — втулка индуктора; *13* — втулка ротора; *15* — гайка крепления шкива; *16* — шкив; *17* — вентилятор; *18* — подшипниковый щит; *19* — задняя крышка; *20* — вывод «+» («30»); *21* — устройство регулирования напряжения; *22* — гайки крепления регулятора; *23* — болт крепления выпрямителя; *24* — переключатель посезонной регулировки

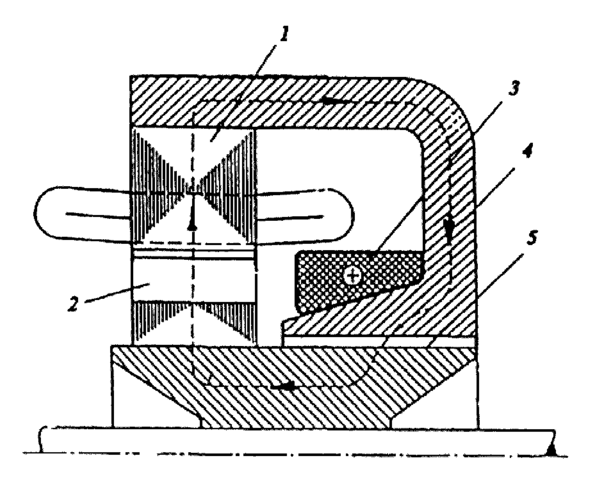


Рис. 1.6. Контур замыкания силовых линий магнитного поля в продольном сечении активной части генератора:

1 — пакет статора; *2* — пакет ротора; *3* — обмотка возбуждения; *4* корпус; *5* — вал магнитопроводящий

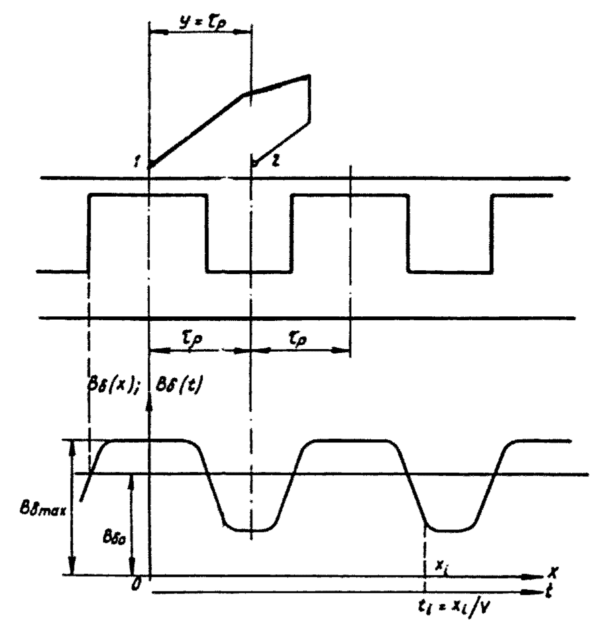


Рис. 1.7. Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре *В*δ от координаты *х* и от времени

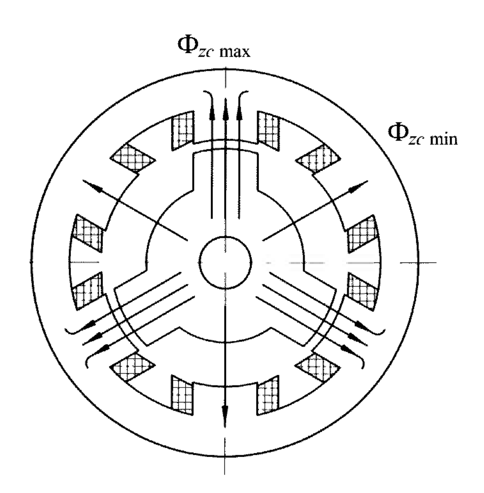


Рис. 1.8. Картина распределения магнитных потоков в зубцовой зоне индукторного генератора

Увеличение нагрузки в индукторных генераторах сопровождается уменьшением магнитного потока в зубцах якоря при размещении под ними зубцов ротора (уменьшением максимального значения магнитного потока в них) и возрастанием магнитного потока в тех же зубцах при размещении под ними впадин ротора (возрастанием минимального значения магнитного потока в зубцах) (рис. 1.8). В результате индуктируемая в обмотке якоря (её катушках, фазах) ЭДС уменьшается в соответствии с изменением численного значения коэффициента использования магнитного потока:

$$K_{ис} = \frac{\Phi_{zc\,max} - \Phi_{zc\,min}}{2\Phi_{zc\,max}}, \qquad (1.1)$$

где $\Phi_{zc\,max}$ и $\Phi_{zc\,min}$ — максимальное и минимальное значения магнитных потоков в зубцах статора.

Максимальное значение коэффициента $K_{ис}$ имеет место в режиме холостого хода генератора, но оно не превышает 0,5. Для сравнения: в синхронных генераторах классической конструкции (в альтернативных электрических машинах) этот коэффициент независимо от нагрузки равен 1.

Таким образом, индукторные генераторы при выполнении их на одинаковые условия с альтернативными машинами не могут составить им конкуренцию в тех случаях, когда целесообразность выбора

генератора для конкретного применения оценивается по уровню их массогабаритных показателей. Этот очень существенный для всех областей техники недостаток индукторных генераторов тем не менее не помешал им утвердиться в некоторых из них благодаря свойственным им высоким эксплуатационным качествам, обусловленным простотой конструкции, высокими механическими свойствами их роторов и (что особенно важно для генераторов автономных систем электроснабжения) естественной их бесконтактностью.

Определённая роль в выборе именно индукторных генераторов для применения в СЭС различного рода автономных объектов принадлежит их высоким технологическим свойствам.

Очень важным качеством индукторных генераторов, полностью снимающим проблему их самовозбуждения, является простота реализации в них комбинированной системы возбуждения. В отличие от всех других модификаций синхронных генераторов, включая генераторы с когтеобразными полюсами, формирование комбинированной системы возбуждения в индукторных генераторах не приводит к серьёзным изменениям их магнитной системы, усложнению конструкции индуктора и обязательному в таких случаях ухудшению массогабаритных показателей. Напротив, в случае введения в магнитную цепь этих электрических машин в дополнение к обмотке возбуждения постоянных магнитов можно получить до 30 % увеличения их мощности, что с избытком компенсирует возрастание массы генератора за счёт установки в нём постоянных магнитов.

На рис. 1.9 показан один из наиболее простых и легко реализуемых вариантов преобразования индукторных генераторов с электромагнитным возбуждением в генераторы с комбинированной системой возбуждения. Размещение постоянных магнитов между зубцами ротора не требует изменения его размеров и размеров статора, но вместе с тем оказывает существенное влияние на структуру магнитного поля в зубцовой зоне генератора. Это влияние проявляется в изменении направления векторов магнитной индукции в воздушном зазоре, заключённом между боковыми поверхностями зубцов ротора (в его впадинах), и вследствие этого в преобразовании системы однополярных его полюсов в генераторе с электромагнитным возбуждением в систему чередующихся по расточке полюсов в генераторе с комбинированной системой возбуждения. Результатом изменения знака кривой распределения магнитной индукции в областях воздушного зазора, прилегающих к постоянным магнитам, является возрастание амплитуды переменной

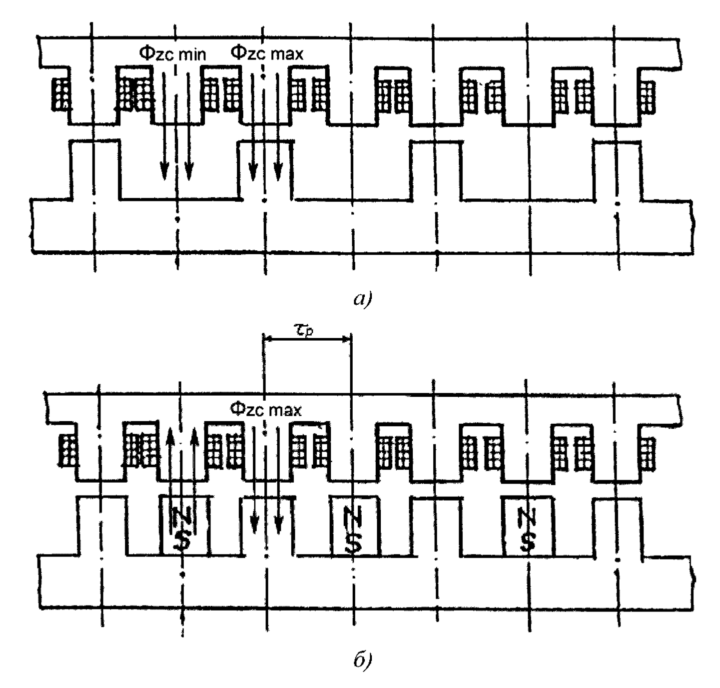


Рис. 1.9. Зубцовые зоны генераторов с электромагнитным (*а*) и комбинированным (*б*) возбуждением

составляющей этой кривой при одновременном уменьшении её постоянной составляющей и, как следствие, возрастание коэффициента использования магнитного потока и развиваемой генератором мощности.

Для иллюстрации этого положения на рис. 1.10 применительно к зубцовой зоне генератора, выполненной согласно схеме, изображенной на рис. 1.9, показаны зависимости магнитных потоков в воздушных зазорах, прилегающих к зубцам ротора и размещённым между ними постоянным магнитам, от МДС обмотки возбуждения для случая, когда она направлена встречно МДС постоянных магнитов.

Протяжённость каждого из этих зазоров вдоль расточки ротора равна половине зубцового деления ротора (полюсному его делению $\tau_р$). За положительное направление магнитных потоков принято направление, совпадающее с направлением воздействия на зубцовую зону генератора МДС обмотки возбуждения.

При обесточенной обмотке возбуждения магнитный поток $\Phi_{\tau z} = \Phi_{\tau z М0}$ создаётся только постоянным магнитом, но он меньше общего

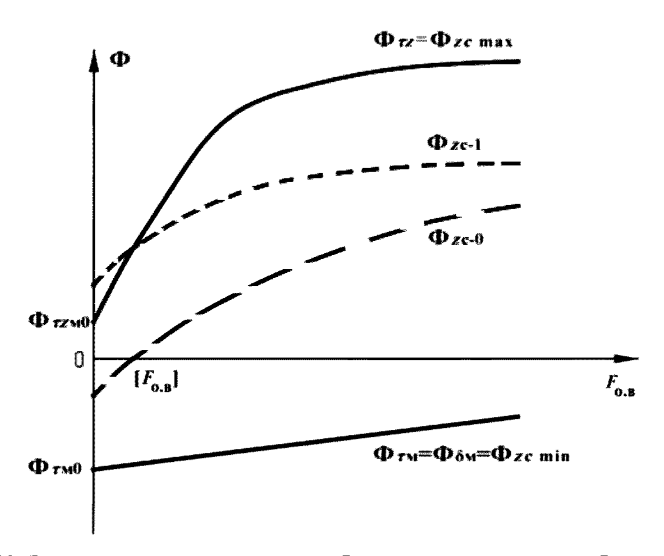
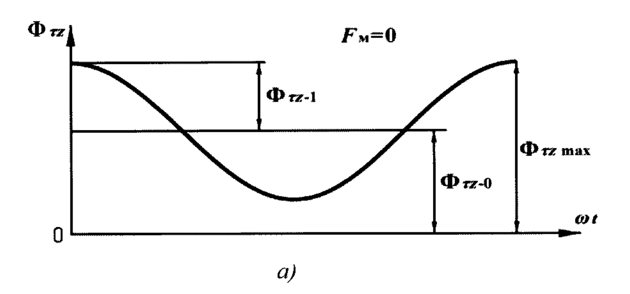


Рис. 1.10. Зависимости максимального $\Phi_{zc\ max}$ и минимального $\Phi_{zc\ min}$ потоков в зубцах и их постоянной $\Phi_{zc\text{-}0}$ и переменной $\Phi_{zc\text{-}1}$ составляющих от МДС обмотки возбуждения

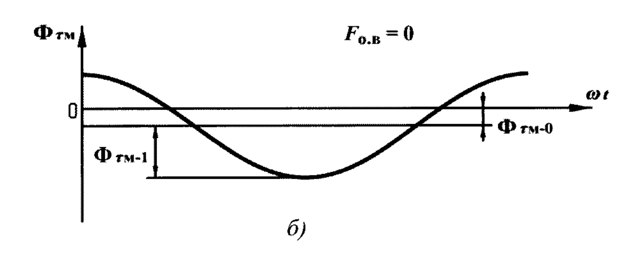
потока магнита $\Phi_{\tau z}$ на ту его часть, которая замыкается (см. рис. 1.6) по внешнему контуру (через корпус, крышку и вал). При протекании по обмотке возбуждения тока в магнитном потоке $\Phi_{\tau z}$ появляется ещё одна его составляющая, обусловленная действием МДС этой обмотки, в связи с чем этот поток становится больше потока $\Phi_{z\text{м}}$. Вследствие нелинейности магнитных характеристик магнитопровода зависимость $\Phi_{\tau z}(F_{\text{о.в}})$ имеет форму, аналогичную форме кривой намагничивания стали магнитопровода генератора, но исходит она не из начала координат, а из точки, отстоящей от неё по оси ординат на расстоянии, равном значению потока $\Phi_{\tau z\text{м}0}$.

Постоянный магнит при встречном включении обмотки возбуждения подвергается размагничивающему воздействию её МДС, поэтому с ростом МДС возбуждения магнитный поток магнита $\Phi_{\tau\text{м}}$ уменьшается, но это уменьшение из-за малой магнитной проницаемости постоянного магнита происходит значительно медленнее по сравнению с ростом магнитного потока $\Phi_{\tau z}$.

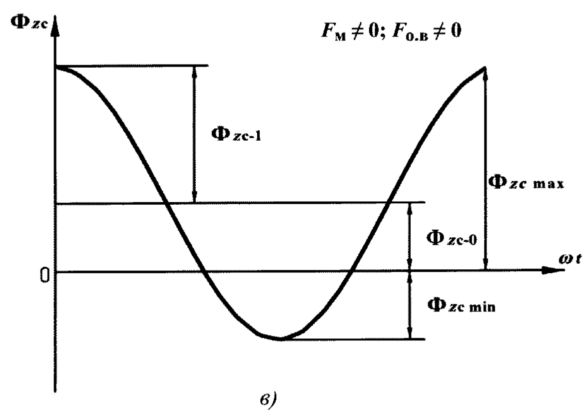
Очевидно, что магнитный поток в каждом из зубцов статора Φ_{zc} при вращении ротора периодически изменяется от $+\Phi_{zc\ \max} = \Phi_{\tau z}$ до $-\Phi_{zc\ \min} = \Phi_{\tau\text{м}}$ т.е. в отличие от индукторных генераторов с электро-



а)



б)



в)

Рис. 1.11. Кривые изменения первых гармонических магнитного потока в зубцах статора:

а при отсутствии в магнитной цепи генератора постоянных магнитов; *б* при $F_{о.в}$ = 0; *в* при совместном действии МДС обмотки возбуждения и постоянного магнита

магнитным возбуждением он является знакопеременным (рис. 1.11), но так же как, и в этих машинах, в кривой изменения магнитного потока в зубцах помимо переменной составляющей

$$\Phi_{zc\text{-}0} = \frac{\Phi_{zc\max} - \Phi_{zc\min}}{2} = \frac{\Phi_{\tau z} - \Phi_{\tau м}}{2} \qquad (1.2)$$

содержится ещё и постоянная составляющая

$$\Phi_{zc\text{-}0} = \frac{\Phi_{zc\max} + \Phi_{zc\min}}{2} = \frac{\Phi_{\tau z} + \Phi_{\tau м}}{2}. \qquad (1.3)$$

Переменная составляющая магнитного потока в зубцах статора с ростом МДС обмотки возбуждения непрерывно увеличивается, а постоянная составляющая сначала уменьшается до нуля, а затем увеличивается, но с другим знаком. МДС обмотки возбуждения, при которой постоянная составляющая магнитного потока в зубцах якоря равна нулю, обеспечивает работу генератора комбинированного возбуждения в режиме обычной синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов с наивысшей для него степенью использования магнитного потока (коэффициент использования магнитного потока в этом режиме равен 1). При работе генератора в этом режиме МДС обмотки возбуждения, действуя встречно МДС постоянных магнитов, полностью перекрывает путь создаваемому ими магнитному потоку в корпус, магнитопроводящую крышку и вал, ограничивая тем самым область, занимаемую силовыми линиями их магнитного поля лишь зубцовой зоной генератора. Таким образом обмотка возбуждения в генераторах комбинированного возбуждения является своеобразным переключателем источников постоянного магнитного поля. При $F_{о.в} < [F_{о.в}]$ постоянная составляющая магнитного потока в зубцах статора создаётся преимущественно постоянным магнитом, а при $F_{о.в} > [F_{о.в}]$ — преимущественно обмоткой возбуждения. При всех соотношениях между МДС обмотки возбуждения и постоянных магнитов постоянная составляющая этого потока меньше постоянной его составляющей в том же генераторе при изъятых из его конструкции постоянных магнитах.

Это обстоятельство и является причиной более высокого уровня массогабаритных показателей индукторных генераторов комбинированного возбуждения по сравнению с генераторами с электромагнитным возбуждением. Помимо этого магнитная цепь генераторов комбинированного возбуждения по той же причине более чувствительна к изменению МДС обмотки возбуждения и вследствие этого допускает более глубокое регулирование магнитного потока.

Крепление постоянных магнитов к ротору обеспечивается либо с помощью специальных склеивающих составов, либо, как это сделано

в промышленных образцах, размещением их на выполненных из алюминиевых сплавов консольных конструкциях.

Электрические машины, магнитное поле в которых является знакопеременным и в кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре которых содержится постоянная составляющая, называются альтернативно-пульсационными машинами.

1.3. Рабочие характеристики автомобильных генераторов

Все вопросы, связанные с выявлением функциональных возможностей генераторов, включая их способность обеспечить нормальное функционирование приёмников электроэнергии в конкретных СЭС в требуемом диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения привода, решаются на основе совместного анализа их рабочих характеристик: внешних (естественных и при работе генератора с регулятором напряжения), регулировочных, скоростных, токоскоростных (ТСХ) и характеристик холостого хода.

Форма внешних характеристик генераторов (речь идёт о генераторах переменного тока) зависит от способа их возбуждения и характера нагрузки (активная, емкостная или индуктивная), а форма регулировочных характеристик, кроме того, от реализованного в них способа регулирования напряжения. От особенностей построения магнитной цепи генераторов форма рабочих характеристик генераторов не зависит. Исключением может явиться лишь характеристика холостого хода индукторных генераторов, которая при значительных токах возбуждения из-за насыщения зубцов и вызванного этим перераспределения магнитных потоков в зубцовой зоне этих машин может изменить знак производной.

Каждая из рабочих характеристик воспроизводит зависимость между двумя электрическими параметрами генераторов при постоянстве всех других параметров, которые оказывают влияние на их численные значения.

На рис. 1.12—1.17 показаны типовые характеристики генераторов переменного тока.

Наибольший практический интерес для разработчиков автотракторного электрооборудования представляют характеристики генератора при его работе на активную нагрузку, так как в СЭС автомобилей и тракторов вся вырабатываемая генераторами электроэнергия поступает к потребителям через выпрямительные устройства.

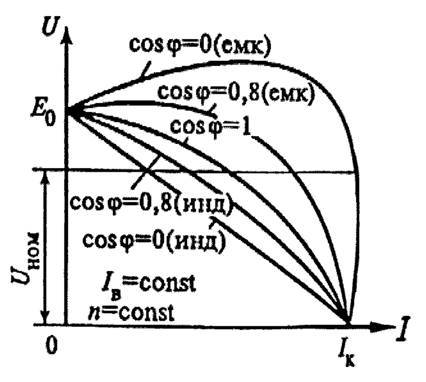


Рис. 1.12. Внешние характеристики генератора при различном характере нагрузки

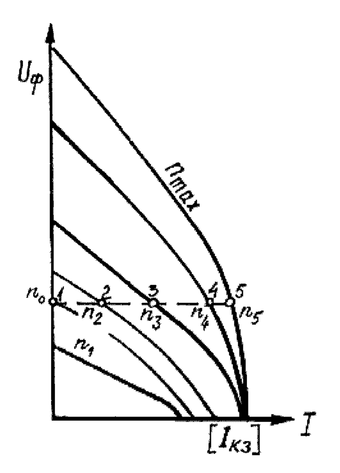


Рис. 1.13. Взаимное расположение естественных внешних характеристик генератора независимого возбуждения при фиксированном значении тока в обмотке возбуждения

Рис. 1.14. Внешние характеристики генераторов с независимым (кривая *1*) и параллельным возбуждением (кривые *2* и *3*)

На рис. 1.13 и 1.14 показано взаимное расположение естественных внешних характеристик генератора независимого и параллельного возбуждения при фиксированном значении тока в обмотке возбуждения (эти характеристики нанесены сплошными линиями). Уменьшение напряжения генератора с ростом нагрузки вызвано размагничивающим действием реакции якоря и возрастанием падения напряжения в фазах обмотки якоря, а уменьшение его при снижении частоты вращения — уменьшением индуктируемой в них ЭДС.

Пунктирная линия, проведённая через точки внешних характеристик, соответствующих номинальному уровню напряжения генератора, характеризует такие режимы его работы, при которых падение напряжения в обмотке якоря и размагничивающее действие МДС якоря на магнитное поле возбуждения и обусловленное этими факторами уменьшение ЭДС полностью компенсируются увеличением частоты вращения. Необходимость в изменении тока возбуждения для сохранения постоянного напряжения генератора при работе его в этих режимах отсутствует.

Во всех других случаях изменения нагрузки и частоты вращения ток возбуждения для сохранения постоянства напряжения приходится принудительно с помощью регуляторов напряжения изменять в строгом соответствии с регулировочными характеристиками. Требуемые для обеспечения постоянства напряжения законы изменения тока возбуждения в функции тока нагрузки и частоты вращения качественно в виде кривых $I_В(I)$ и $I(n)$ показаны на рис. 1.15, *а*, *б*, *в* и 1.16 *а*, *б*. Крутизна регулировочных характеристик зависит от размеров магнитопровода генератора, геометрии полюсной системы индуктора и зубцово-пазового слоя и от активного и индуктивных сопротивлений обмотки якоря. Особенно заметное влияние на крутизну регулировочных характеристик, а следовательно, и на требуемый для обеспечения постоянства напряжения диапазон изменения тока возбуждения оказывает индуктивное сопротивление по продольной оси генератора X_d. Чем больше это сопротивление, тем шире этот диапазон и тем на более высокие значения тока должен быть рассчитан выходной каскад усилителя регулятора напряжения.

Частота вращения вала генератора n_0, при которой его напряжение достигает номинального значения, получила название частоты вращения холостого хода $n_0 = n_Х$ или частоты начала отдачи мощности. Начиная с этой частоты вращения, генератор приобретает способность отдавать потребителям мощность, сохраняя при этом (с помощью регулятора напряжения) напряжение на них на уровне номинального его значения. Частота вращения $n_{р\ max}$ соответствует верхней границе диапазона регулирования напряжения по частоте вращения. Эта частота вращения незначительно отличается от регламентируемой соответствующими отраслевыми документами максимальной его частоты вращения $n_{max} (n_{р\ max} > n_{max})$. Мощность, развиваемая генератором при n_{max}, принимается за максимальную его мощность (в специальной литературе по автотракторному электрооборудованию часто встречается определение этой мощности как номинальной мощности генератора).

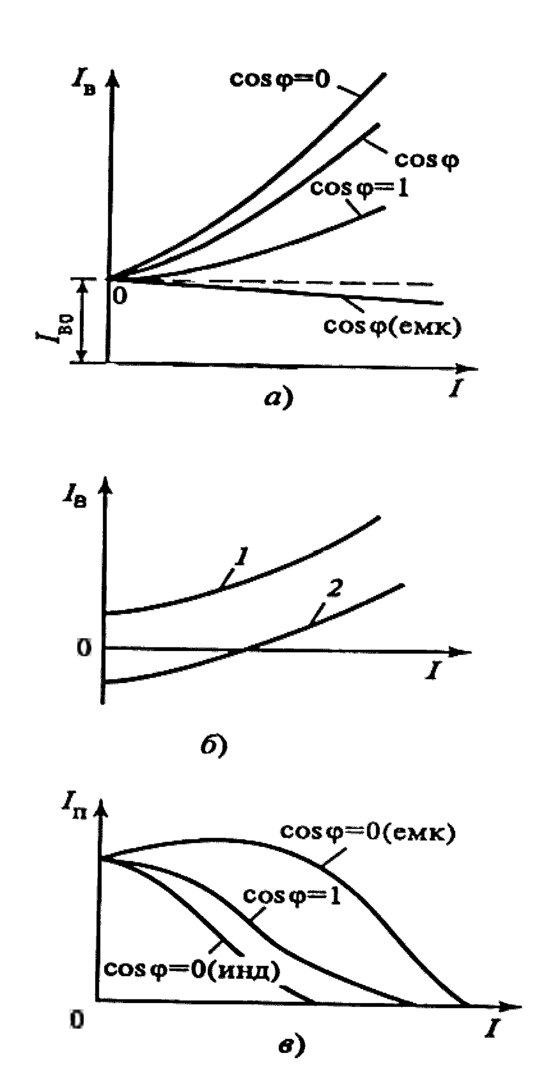


Рис. 1.15. Регулировочные характеристики генераторов:
а — с электромагнитным возбуждением; *б* — с комбинированной системой возбуждения; *в* — с подмагничиванием спинки якоря

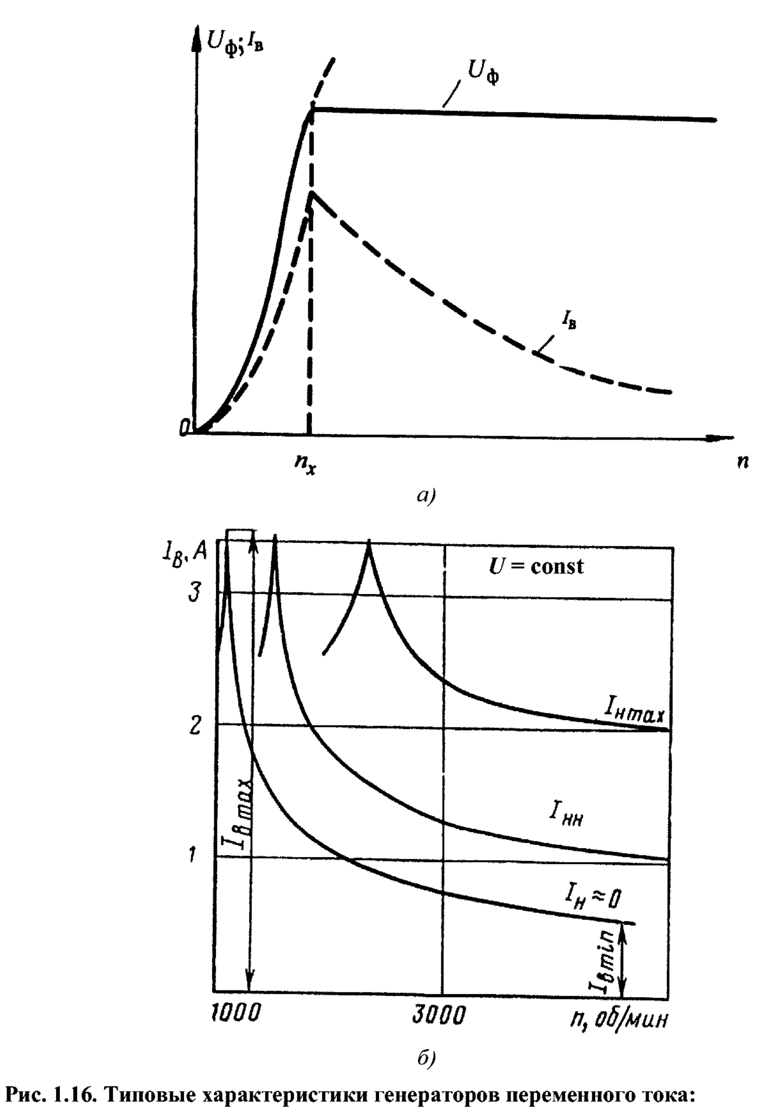


Рис. 1.16. Типовые характеристики генераторов переменного тока:
а скоростная и регулировочная характеристики; *б* регулировочные характеристики при различных нагрузках

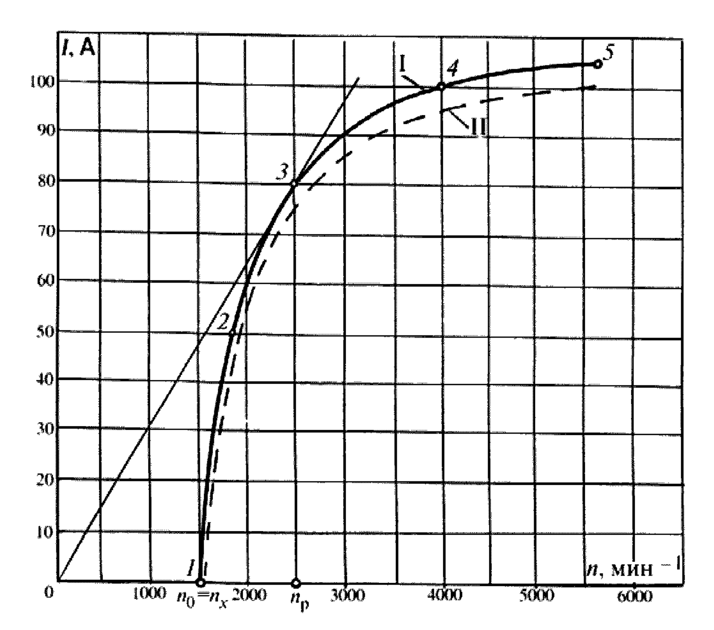


Рис. 1.17. Токоскоростные характеристики генераторов

В связи с тем, что ЭДС холостого хода связана с частотой вращения прямой пропорциональной зависимостью, а ток короткого замыкания зависит не только от индуктируемой в обмотках якоря ЭДС, но и от активного и индуктивных сопротивлений фаз, которые так же, как и ЭДС холостого хода прямо пропорциональны частоте вращения, область размещения внешних характеристик по оси токов ограничена. Предельное значение тока, которое может иметь место в фазах генератора при синусоидальных законах изменения в нём электрических и магнитных параметров можно определить из выражения

$$I_{\text{кз}} = \frac{E_0\sqrt{R_\text{ф}^2 + X_q^2}}{R_\text{ф}^2 + X_q X_d}, \tag{1.4}$$

где E_0 — ЭДС холостого хода:

$$E_0 = 4\text{K}_{\text{ф}E} w_\text{ф} f\, \Phi_{\delta 0} \text{K}_{\text{ис}\,0}, \tag{1.5}$$

где $f = pn/60$; $\text{K}_{\text{ф}E}$ — коэффициент формы кривой ЭДС; $\text{K}_{\text{ис}\,0}$ — коэффициент использования магнитного потока в режиме холостого

хода; $R_ф$ — активное сопротивление фазы обмотки якоря; X_d, X_q — индуктивные сопротивления соответственно по продольной и поперечной осям генератора:

$$X_d = 2\pi f w_ф^2 \Lambda_d,$$
$$X_q = 2\pi f w_ф^2 \Lambda_q. \qquad (1.6)$$

где Λ_d, Λ_q — магнитные проводимости для магнитных потоков по продольной и поперечной осям генератора.

При высоких частотах вращения индуктивные сопротивления фаз становятся значительно больше их активного сопротивления, поэтому согласно приведённым зависимостям предельное значение тока короткого замыкания $I_{кз}$ можно определить из выражения

$$I_{кз} = [I_{кз}] = \frac{E_0}{X_d} = \frac{4K_{фE} w_ф \Phi_{\delta 0} K_{ис\,0}}{2\pi f w_ф^2 \Lambda_d} = \frac{2K_{фE} \Phi_{\delta 0} K_{ис\,0}}{w_ф^2 \Lambda_d}. \qquad (1.7)$$

Присущее генераторам свойство не допускать протекания по обмоткам якоря тока, большего определённой величины, получило название самоограничения по току.

Сопоставляя положения точки, соответствующей номинальному напряжению на внешних характеристиках генератора, при изменении нагрузки (см. рис. 1.13) можно заметить, что с ростом нагрузки эта точка перемещается из положения, которое она занимала при холостом ходе в положение, близкое к точке короткого замыкания. Следует обратить внимание при этом, что при вполне определённой частоте вращения, равной $n_р$ (назовём её расчётной), эта точка располагается в точке максимальной мощности конкретной внешней характеристики, которая примечательна тем, что, во-первых, в соответствующем ей режиме работы генератора момент на валу равен максимальному своему значению (отношение мощности генератора к частоте вращения в ней больше, чем в любой другой точке, принадлежащей этой и всем другим внешним характеристикам) и, во-вторых, с точки зрения теплового состояния элементов и узлов электромагнитной части генератора этот режим работы генератора является самым неблагоприятным.

Наиболее востребованными в области автотракторного электрооборудования являются токоскоростные характеристики генераторов (см. рис. 1.17).

Токоскоростная характеристика конкретного генератора может быть получена экспериментально, построена графическим способом на основе внешних характеристик или рассчитана по формулам. В графическом представлении она является отображением в координатных осях [*I*, *n*] отрезка прямой линии, соединяющего точки внешних характеристик с одинаковым (равным номинальному) значением напряжения (см. на рис. 1.13 отрезок *1*—*5*). Практическое значение ТСХ состоит в том, что она позволяет оценить энергетические возможности генератора в пределах всего рабочего диапазона частот вращения двигателя автомобиля, а также способность его обеспечить требуемый баланс электроэнергии на конкретном автомобиле при наиболее напряжённых с точки зрения энергопотребления режимах его эксплуатации. Для решения этих задач необходимо оперировать предельными численными значениями электромагнитных параметров генераторов, поэтому ТСХ строятся при токе возбуждения, равном максимально допустимому току через регулятор напряжения.

При решении практических вопросов, связанных с выявлением целесообразности выбора для применения в конкретной СЭС автомобиля того иного генератора, а также других вопросов, требующих для своего решения сопоставления токоскоростных характеристик, важно знать, что наиболее напряженному тепловому режиму работы всех генераторов соответствует точка соприкосновения с их ТСХ прямой, проходящей через начало координат (точка *3* на рис. 1.17).

Экспериментальное определение ТСХ на предприятиях производится в соответствии с предписаниями международного стандарта.

Характеристика снимается при работе генератора совместно с полностью заряженной аккумуляторной батареей с номинальной ёмкостью, выраженной в ампер-часах, составляющей не менее 50 % номинальной силы тока генератора. Характеристика может сниматься в холодном и нагретом состояниях генератора. При этом под холодным состоянием понимается такое его состояние, при котором температура всех частей и узлов в нём равна температуре окружающей среды. Для того чтобы предотвратить работу регулятора напряжения при снятии ТСХ, её снимают не при 14 В, а при меньшем напряжении (13,5 В).

Перед снятием ТСХ, соответствующей нагретому состоянию генератора, его прогревают в течение 30 мин при частоте вращения ротора 3000 об/мин.

К аналитическому методу определения ТСХ генераторов обращаются в процессе их проектирования (на стадии поверочного электро-

магнитного расчёта). Степень соответствия полученных расчётным путём характеристик реальным ТСХ зависит от полноты отражения используемыми при расчётах математическими моделями взаимосвязей между электромагнитными параметрами проектируемых генераторов.

При выполнении расчётных заданий, предусмотренных учебным планом специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов», можно ограничиться простым, но в то же время позволяющим получить вполне достоверные результаты соотношением [2]

$$n = n_{\text{х}} \frac{IR_{\text{ф}} + U_{\text{ф}}}{\sqrt{U_{\text{фх}}^2 - (IX_{d\text{х}})^2}} = n_{\text{х}} \frac{I_d \text{K}_I R_{\text{ф}} + U_{\text{ф}}}{\sqrt{U_{\text{фх}}^2 - (I_d \text{K}_I X_{d\text{х}})^2}}, \tag{1.8}$$

где n — частота вращения вала генератора (текущее значение); $n_{\text{х}}$ — частота вращения, соответствующая началу отдачи генератором мощности в нагрузку; $U_{\text{фх}}$ — фазное напряжение, при котором в режиме холостого хода выпрямленное напряжение на нагрузке U_d равно номинальному; $U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение на нагрузке (при токе I_d), при котором $U_d = U_{d\text{н}}$; $X_{d\text{х}} = \frac{n_{\text{х}}}{n} X_d$.

Для определения координат ТСХ достаточно задаться несколькими значениями выпрямленного тока $(I_d + I_{\text{в}})$ и для каждого из них определить соответствующие значения фазного напряжения $U_{\text{ф}}$, используя для этого кривые $U_{\text{ф}}(I_d)$ и коэффициента выпрямления по току $\text{K}_I(I_d)$. Индуктивное сопротивление $X_{d\text{х}}$ и активное сопротивление $R_{\text{ф}}$ считаются известными. $U_{\text{фх}}$ определяется с учётом схемы выпрямительного моста. Применительно к трёхфазной мостовой схеме выпрямления $U_{\text{фх}} = U_d \text{K}_{U\text{х}}$ коэффициент выпрямления напряжения $\text{K}_{U\text{х}}$ можно принять равным его значению возбуждения как в режиме холостого хода: $\text{K}_{U\text{ф}} = \text{K}_{U\text{ф}0} = 0,427$.

Применяя формулу (1.8), следует иметь в виду, что она получена при условии равенства индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям генератора.

В автомобильных генераторах обмотка возбуждения подключена на средневыпрямленное значение напряжения генератора, т.е. фактически того напряжения, которое создаётся протекающим по ней током и которое в то же время является обязательным условием появления самого этого тока. Очевидно, что при такой взаимосвязи между

напряжением и током возбуждения ток короткого замыкания генератора в СЭС с вентильными генераторами параллельного возбуждения в отличие от генераторов с независимым возбуждением (см. рис. 1.14) равен нулю (механизм возникновения напряжения на зажимах генератора из-за наличия остаточного магнетизма в вентильных генераторах не работает) и внешние их характеристики в области малых значений подключённых к сети потребителей претерпевают излом и идут в направлении начала координат. Помимо этого внешние характеристики вентильных генераторов отличаются от характеристик генераторов с независимым возбуждением бóльшей крутизной (бóльшим статизмом) верхней своей части, вследствие того, что ток в фазах их обмоток якоря, а следовательно, и падение напряжения в них больше чем у генераторов с независимым возбуждением. Некоторое уменьшение напряжения происходит также за счёт усиления по этой же причине размагничивающего воздействия на магнитное поле в генераторе реакции якоря.

Влияние способа возбуждения генератора на его ТСХ показано на рис. 1.17. На нём нанесены две ТСХ. Одна из них определяет зависимость действующего значения тока нагрузки от частоты вращения при питании цепи возбуждения от независимого источника (кривая I), а вторая (кривая II) — при питании её от генератора через выпрямительное устройство. Цифровые обозначения точек на характеристиках проставлены в соответствии с их обозначениями на рис. 1.13. Расстояние по оси ординат между кривыми при всех частотах вращения равны значению тока возбуждения, применительно к которому построены эти характеристики (максимальному его значению). Поступление мощности в нагрузку от генераторов параллельного возбуждения начинается при более высоких частотах, чем от тех же генераторов при питании их обмотки возбуждения таким же по величине током, но от постороннего источника.

Что же касается регулировочных характеристик генераторов, то они всецело определяются свойствами их магнитных цепей и по этой причине от способа организации питания их обмоток возбуждения не зависят.

Рабочие характеристики индукторных генераторов с электромагнитным возбуждением за исключением характеристики холостого хода не отличаются от одноимённых с ними характеристик генераторов с когтеобразными полюсами. Что же касается рабочих характеристик генераторов комбинированного возбуждения, то они за исключением регулировочных характеристик при всех вариантах построе-

ния магнитных цепей этих генераторов не отличаются по форме от характеристик генераторов с независимым возбуждением. Регулировочные характеристики генераторов комбинированного возбуждения при некоторых условиях выбора сплава и размеров постоянных магнитов могут определённой своей частью располагаться в четвёртом квадранте (см. рис. 1.15, *в*).

Для регулирования напряжения в генераторах комбинированного возбуждения в полной мере без каких-либо существенных изменений электрической схемы пригодны те же регуляторы напряжения, которые используются в СЭС с генераторами с электромагнитным возбуждением. Разница состоит только в том, что обеспечение требуемого диапазона регулирования напряжения по нагрузке и частоте вращения в генераторах комбинированного возбуждения удаётся обеспечить за счёт изменения меньших токов в обмотке возбуждения и меньших её МДС, и соответственно при меньших сечениях провода и размерах этой обмотки. Так, если максимальное значение тока возбуждения для автомобильных генераторов, как правило, равно 5 А, то для генераторов комбинированного возбуждения его удаётся снизить до 1,5 А.

Разработчикам и персоналу, занимающимися ремонтом генераторов комбинированного возбуждения, важно знать, что сплав и размеры постоянных магнитов должны быть выбраны такими, чтобы напряжение на выходе выпрямительного моста при максимальной частоте вращения вала генератора и минимальной нагрузке не превышало номинального его значения. В противном случае превышение максимального значения частоты вращения вала принятого при проектировании генератора может явиться причиной выхода из строя регулятора напряжения.

Распределение МДС между электромагнитной и электрической частями комбинированной системы возбуждения обычно осуществляется исходя из условия обеспечения минимума массы и габаритов генератора и с учётом его стоимостных показателей.

1.4. Рекомендации по взаимному пересчету напряжений и токов на входе и выходе выпрямительных устройств

В связи с тем, что вырабатываемая генераторами переменного тока электроэнергия в процессе её преобразования в выпрямительных устройствах подвергается как качественным, так и количественным изменениям (преобразуется в электроэнергию постоянного тока с

другими численными значениями и другими законами изменения тока и напряжения), для решения всех практически значимых задач по выбору генераторов для применения в конкретных СЭС, определению их электромагнитной мощности при проектировании на заданную мощность потребителей постоянного (выпрямленного) тока и других необходимо располагать информационно-справочным материалом по взаимному пересчёту параметров, характеризующих электроэнергию до и после выпрямительного моста. Другими словами, необходимо иметь представленные в графическом или аналитическом виде зависимости токов, напряжений и мощностей на сторонах переменного и постоянного токов выпрямительных устройств.

Вследствие чрезвычайно сложного характера электромагнитных процессов, происходящих в магнитной и электрической цепях вентильных генераторов, обусловленного нелинейностями магнитных характеристик магнитопровода и характеристик выпрямительных устройств, а также значительными индуктивностями обмоток якоря и изменением их во времени по очень сложным, не поддающимся простому математическому описанию, законам, получить такие зависимости в виде простых и удобных для расчётов и теоретических исследований аналитических выражений удаётся только в случае принятия ряда допущений, существенно упрощающих истинную картину электромагнитных процессов и соответственно реальные (рис. 1.18, *а*) законы изменения напряжений и токов.

Эти допущения касаются формы кривых изменения фазных напряжений генератора, вольт-амперных характеристик диодов, а также продолжительности и внешних проявлений коммутационных процессов. Наиболее распространёнными из них являются допущения о синусоидальном изменении фазного напряжения во всех режимах работы вентильного генератора, о бесконечной проводимости диодов выпрямительного устройства во всём допустимом для них диапазоне токов и об изменении напряжения на нагрузке (выпрямленного напряжения) в течение всего времени коммутации по косинусоиде с амплитудой, равной значению фазных напряжений в точке их пересечения (см. рис. 1.18, *в*).

Что же касается продолжительности коммутационных процессов, измеряемой временем переходного процесса в системе, вызванного отключением от нагрузки одной из двух работающих на неё фаз генератора и подключением к ней очередной его фазы, то определение её при любых допущениях относительно кривых изменения напряжений

и токов может привести к значительным ошибкам. Объясняется это тем, что время переходного процесса в системе «генератор — выпря-

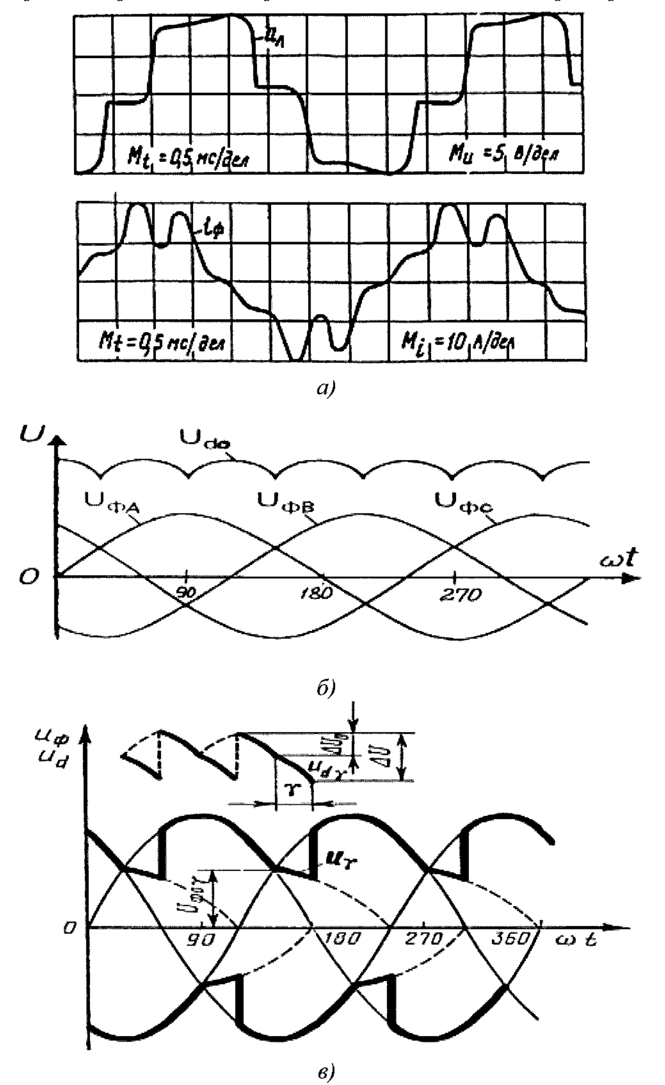


Рис. 1.18. Кривые напряжений и тока вентильного генератора:

а — экспериментальные кривые изменений напряжения и тока вентильного генератора; *б*, *в* — теоретические кривые фазных $U_ф$ и выпрямленного U_d напряжений в

режиме холостого хода и при нагрузке соответственно (γ продолжительность коммутации в электрических градусах; ΔU пульсации напряжения)

митель — нагрузка» зависит от объёма магнитной энергии, сосредоточенной в отключаемой фазе, а следовательно, от мгновенных значений тока в ней и от её индуктивности, а не от их действующих или средних значений, которые не столь чувствительны к искусственным упрощениям законов изменения измеряемых ими величин. Несинусоидальность же кривой тока может быть столь значительна, что мгновенное его значение на момент коммутации может существенно отличаться от значения основной гармонической и тем более от значений искусственно вводимых для упрощения расчётов других кривых.

При упрощении законов изменения электромагнитных параметров вентильных генераторов до синусоидальных действующие значения фазных напряжений и токов и средневыпрямленные их значения относительно просто определяются в зависимости от вычисленного при тех же условиях угла коммутации γ [4], поэтому ошибка определения этого угла напрямую трансформируется в ошибку определения токов и напряжений, которая также может быть значительной.

Учитывая это обстоятельство, при разработке автомобильных генераторных установок для взаимного пересчёта параметров на сторонах постоянного и переменного токов выпрямительных устройств используются преимущественно экспериментальные данные в виде кривых, определяющих зависимости действующих значений напряжений и токов в автомобильных генераторах различной мощности от относительного значения суммарного тока на стороне постоянного тока. В качестве примера на рис. 1.19 приведена экспериментальная кривая, определяющая зависимость коэффициента преобразования тока $К_I = I_ф / I_d$ от относительного значения выпрямленного тока $I_d / I_{d\,max}$. ($I_{d\,max} = 3I_{кл}$; $I_{кл}$ — нормированное максимальное значение тока через диод). На рис. 1.20 показаны кривые, связывающие действующие значения фазного напряжения со средневыпрямленными значениями тока для двух промышленных выпрямительных блоков, устанавливаемых на отечественные автомобильные генераторы мощностью до 1,5 кВт.

В специальной литературе и информационных материалах отраслевых предприятий зависимость фазного напряжения от среднего значения выпрямленного тока приводится и в другом виде, а именно в виде зависимости их отношения $К_{Uф} = U_ф / U_d$ от относительного или абсолютного значения выпрямленного тока. Аналогично пред-

ставляется и зависимость от тех же значений тока и линейного напряжения. Приведённые в доступных для ознакомления источниках

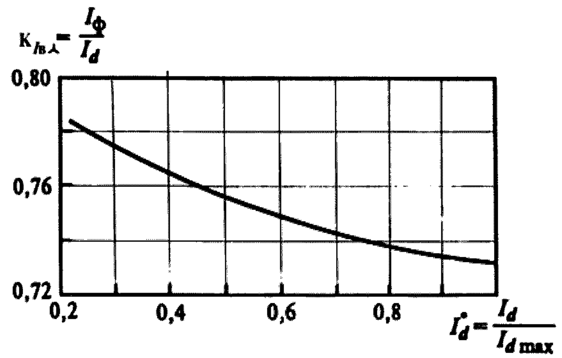


Рис. 1.19. Зависимость коэффициента преобразования тока от относительного значения выпрямленного тока

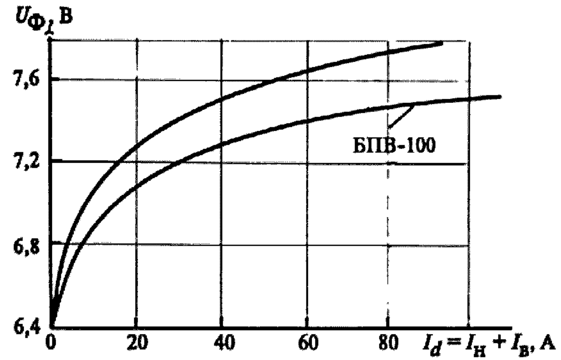


Рис. 1.20. Зависимость фазного напряжения от средневыпрямленного значения тока

результаты экспериментальных исследований автомобильных генераторов мощностью 350—750 и 750—1250 Вт свидетельствуют о том, что при возрастании нагрузки коэффициент $К_{Uф}$ увеличивается от 0,48 (при холостом ходе) до 0,56 при номинальной нагрузке. Коэффициент $К_{Uл}$ при тех же условиях увеличивается от 0,84 до 0,97, а коэффициент выпрямления по току $К_I$ — от 0,73 до 0,8.

Значение коэффициента выпрямления фазного напряжения $К_{Uф}$ вследствие искажения формы кривой напряжения и падения напряжения на вентилях в 1,11—1,31 раз выше указанной в литературе тео-

ретической величины для схемы выпрямления Ларионова, равной для идеальных условий коммутации 0,428. Коэффициент выпрямления по току при тех же условиях меньше теоретической, равной 0,818, в 1,02—1,12 раза. Вследствие различного искажения форм фазного и линейного напряжений и тока расчётные мощности генератора могут иметь два значения:

$$P_{\sim 1} = mU_{\text{ф}} I_d = m\text{K}_{U\text{ф}}\text{K}_I U_{\text{ф}} I_d;$$
$$P_{\sim 2} = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_d = \sqrt{3}\text{K}_{U\text{л}}\text{K}_I U_{\text{ф}} I_d. \quad (1.9)$$

Для трёхфазных генераторов, обмотки якоря в которых соединены в звезду:

$$\frac{P_{\sim 2}}{P_{\sim 1}} = \frac{\sqrt{3}\text{K}_{U\text{л}}}{m\text{K}_{U\text{ф}}}. \quad (1.10)$$

Экспериментальные исследования показывают, что отношение $3\text{K}_{U\text{л}} / \text{K}_{U\text{ф}}$ изменяется в пределах 1,7—1,78, в связи с чем разница в значениях мощности переменного тока, определяемой по приведённым формулам, составляет не более 3 %.

1.5. Системы регулирования напряжения автомобильных генераторов

Необходимый для нормального функционирования потребителей уровень качества электроэнергии в автомобильных СЭС достигается введением в них регуляторов напряжения, фильтров, выбором соответствующих сечений проводов распределительной сети, применением устройств защиты. Положительное влияние на качество электроэнергии оказывают и аккумуляторные батареи. Обладая значительной ёмкостью, они демпфируют кратковременные выбросы и провалы напряжения, возникающие при резких изменениях нагрузки и частоты вращения привода.

Применительно к автомобильным СЭС разработано множество схемных решений регуляторов напряжения. В настоящее время наибольший практический интерес и реальные перспективы на дальнейшее совершенствование и приоритетное применение имеют только бесконтактные транзисторные регуляторы напряжения.

На рис. 1.21 представлена типовая для автомобильных СЭС блок-схема регулятора напряжения [1]. Регулятор *1* содержит измерительный элемент *5*, элемент сравнения *3* и регулирующий элемент *4*. Из-

мерительный элемент воспринимает напряжение генератора *2* (напряжение U_d) и преобразует его в сигнал $U_{изм}$, который в элементе

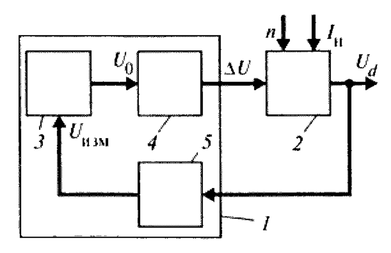


Рис. 1.21. Типовая блок-схема регулятора напряжения

сравнения сравнивается с эталонным значением $U_{эт}$ (напряжение уставки). Если величина $U_{изм}$ отличается от эталонной величины $U_{эт}$, то на выходе измерительного элемента появляется сигнал рассогласования U_0, который активирует регулирующий элемент, изменяющий ток в обмотке возбуждения так, что напряжение возвращается в заданные пределы.

Транзисторные регуляторы напряжения подразделяются на две группы: регуляторы традиционного схемного исполнения с частотой переключения, изменяющейся с изменением режима работы генератора, и регуляторы со стабилизированной частотой переключения, работающие по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Применение ШИМ снижает влияние на работу регулятора внешних воздействий (уровня пульсаций напряжения и др.).

Примером выполнения регуляторов с переменной частотой коммутаций цепи обмотки возбуждения может служить регулятор 17.3702. Упрощённая электрическая схема этого регулятора приведена на рис. 1.22. Питание обмотки возбуждения и элементов регулятора напряжения от дополнительного выпрямительного моста исключает возможность разряда АБ через них при неработающем двигателе. Регулятор напряжения построен по принципу отклонения напряжения генератора от номинального (эталонного) его значения.

Чувствительным к уровню напряжения в системе является делитель напряжения на резисторах *R1* и *R2*. Уровень эталонного напряжения в схему вводится посредством подключения к средней точке делителя напряжения стабилитрона *VD1*. Коммутацию цепи питания обмотки возбуждения генератора обеспечивает полупроводниковое реле (релейный усилитель постоянного тока), образованное транзистором *VT1* и составным транзистором, образованным транзисторами

VT2—VT3 по схеме Дарлингтона. Шунтирующий обмотку возбуждения диод *VD2* обеспечивает защиту составного транзистора, ограни-

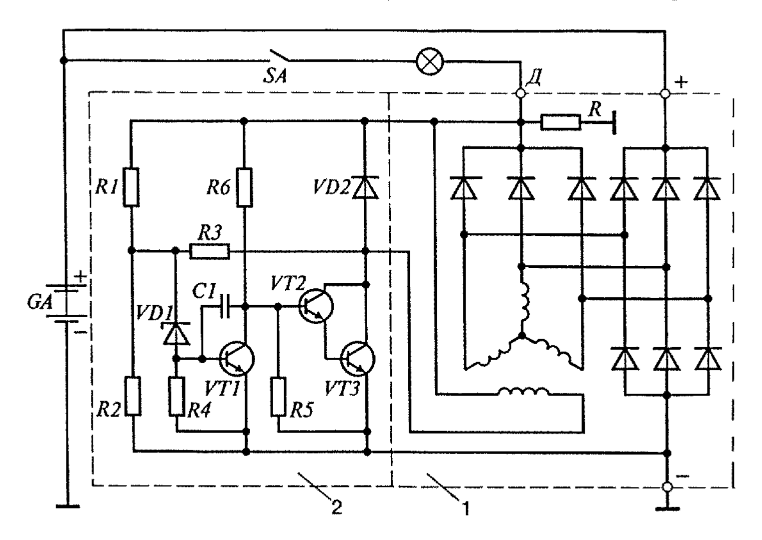


Рис. 1.22. Упрощенная электрическая схема регулятора напряжения:
1 — генераторная часть установки; *2* — регулятор напряжения

чивая ЭДС самоиндукции, возникающую в обмотке возбуждения при закрытии составного транзистора, на уровне прямого падения напряжения на открытом диоде.

Для того чтобы регулятор напряжения вступил в действие, необходимо, во-первых, создать условия для надёжного возбуждения генератора, во-вторых, довести частоту вращения вала генератора до такого уровня, при котором средневыпрямленное значение его напряжения при открытом составном транзисторе *VT2—VT3* и подключённых к сети потребителях достигнет нижнего предела диапазона регулирования.

Ввиду того что процесс самовозбуждения генератора не развивается, начальное возбуждение обеспечивается от АБ. В рассматриваемой генераторной установке при запуске двигателя внутреннего сгорания ток в обмотку возбуждения от АБ поступает через ключ зажигания и контрольную лампу. Начальное возбуждение генератора продолжается до открытия диодов выпрямителя. Дальнейшее его возбуждение происходит уже за счёт тока, поступающего от дополнительного выпрямителя.

Если запуск двигателя внутреннего сгорания осуществляется при включённых в бортовую сеть потребителях электроэнергии, то соответствующую их совокупной нагрузке частоту вращения вала генератора, при которой вступает в действие регулятор напряжения, можно определить по токоскоростной характеристике генератора (см. рис. 1.17).

Свечение контрольной лампы в процессе начального возбуждения генератора указывает на то, что ток в цепь обмотки возбуждения поступает от АБ. После перехода от начального возбуждения генератора от АБ к возбуждению от дополнительного выпрямителя на выводах генератора «Д» и «+» появляется практически одинаковое напряжение, и лампа погасает. Если же напряжения на генераторе при работающем двигателе внутреннего сгорания не появляется вследствие, например, обрыва приводного ремня генератора или обмотки возбуждения, то лампа будет продолжать светиться, извещая тем самым о неисправности генераторной установки.

Введение в схему резистора *R5* обеспечивает свечение контрольной лампы при обрыве обмотки возбуждения.

Работа регулятора в установившемся режиме работы генератора характеризуется следующими моментами.

При работающем на малой частоте вращения двигателе внутреннего сгорания напряжение генератора и, следовательно, напряжение на выходе силового выпрямителя ниже номинального напряжения АБ (12 В). Чувствительный элемент вследствие этого получает питание от АБ. Напряжение на стабилитроне *VD1* при таком уровне напряжения на источниках ниже напряжения его пробоя, транзистор *VT1* выключен, а транзистор *VT2—VT3*, наоборот, включён, и через него по обмотке возбуждения протекает ток. По мере увеличения частоты вращения двигателя средневыпрямленное значение напряжения генератора увеличивается, вызывая рост напряжения на АБ и на нижнем плече делителя *R1—R2*. Когда напряжение достигнет верхней границы диапазона регулирования, стабилитрон *VD1* пробивается, транзистор *VT1* за счёт протекания тока через стабилитрон в переход база-эмиттер открывается, и своим переходом эмиттер-коллектор закорачивает вывод базы транзистора *VT2—VT3*. В результате составной транзистор закрывается, разрывая цепь обмотки возбуждения, и ток в ней с этого момента начинает спадать, замыкаясь через диод *VD2*. Уменьшение тока возбуждения сопровождается уменьшением напряжения в системе, а также падением напряжения на сопротивлении *R2* делителя напряжения и, как следствие уменьшением тока через стабилитрон и базового тока транзистора *VT1*. Последнее обстоятельство

приводит в конечном счёте к закрытию этого транзистора и открытию составного транзистора *VT2—VT3*, очередному нарастанию тока возбуждения, напряжения в бортовой сети и т.д.

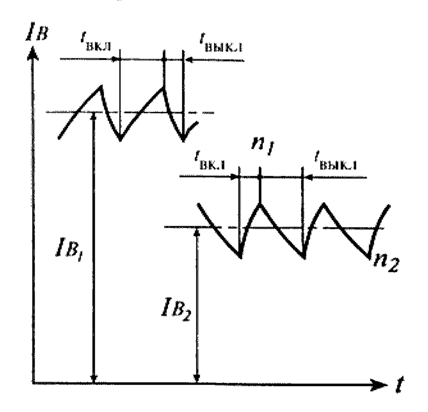


Рис. 1.23. Осциллограммы тока в обмотке возбуждения генератора

При изменении частоты вращения вала генератора и сопротивления нагрузки изменяется чувствительность обмотки якоря к изменению тока в обмотке возбуждения. При более высокой частоте вращения, например, изменение тока возбуждения на такую же величину, что и при более низкой частоте вращения, приводит к более значительному изменению магнитного потока, сцепленного с обмоткой якоря, и вследствие этого к более значительному изменению индуктируемой в ней ЭДС и напряжения на зажимах генератора. В результате амплитуда пульсаций тока возбуждения с ростом частоты вращения уменьшается, а частота их увеличивается (рис. 1.23).

Таким образом, регулирование напряжения в регуляторах рассматриваемого типа происходит за счёт изменения относительного времени включённого состояния обмотки возбуждения при одновременном изменении частоты переключения транзисторов.

При проектировании систем заряда АБ стремятся построить схему регулятора напряжения таким образом, чтобы частота коммутации цепи обмотки возбуждения была не меньше 25 Гц, иначе может быть заметно мигание осветительных приборов.

Для повышения частоты коммутации в схему регуляторов вводят цепочки жёстких и гибких обратных связей. Примером жёсткой обратной связи, способствующей повышению этой частоты, в рассматриваемом регуляторе напряжения является сопротивление *R3*. При открытии составного транзистора *VT2—VT3* это сопротивление оказывается под-

ключённым параллельно сопротивлению *R2*. При этом напряжение на стабилитроне *VD1* резко уменьшается, что ускоряет переключение схемы регулятора и повышает частоту этого переключения.

Конденсатор *C1* является своеобразным фильтром, защищающим регулятор от влияния импульсов напряжения на его входе. Вообще конденсаторы в схемах регуляторов либо предотвращают переход этих схем в колебательный режим и возможность влияния посторонних высокочастотных помех на работу регулятора, либо ускоряют переключения транзисторов. В последнем случае конденсатор, заряжаясь в один момент времени, разряжается на базовую цепь транзистора в другой момент, ускоряя броском разрядного тока переключение транзистора и, следовательно, снижая потери мощности в нём и его нагрев.

Примером регулятора с ШИМ является регулятор Я212А11Е. Он изготавливается по гибридной технологии в металлокерамическом корпусе. Устройство регулятора и его работа рассмотрены в [1]. Этот регулятор осуществляет коммутацию обмотки возбуждения с фиксированной частотой, лежащей в пределах 460 Гц — 2,5 кГц (в зависимости от настройки регулятора). Стабилизация же напряжения, как и в традиционной схеме регулятора, происходит за счёт изменения относительного времени включения обмотки возбуждения в цепь питания с соответствующим изменением средней величины тока в ней. Аналогом регулятора Я212А11Е является регулятор 36.3701.

Недостатком рассмотренных типов регуляторов напряжения являются ограниченные возможности воздействия их на состояние системы электроснабжения. Эти регуляторы реагируют лишь на средний уровень напряжения в системе и обеспечивают его поддержание в рамках допустимых значений в рабочем диапазоне температур входящего в систему охлаждения генератора воздуха.

В настоящее время в системах электроснабжения автомобилей внедрены регуляторы нового поколения, обладающие значительно более широкими функциональными возможностями (многофункциональные регуляторы). Примером такого регулятора напряжения является регулятор 7940.3702. Этот регулятор напряжения предназначен для автоматического регулирования уровня напряжения в автомобильных генераторных установках мощностью до 3 кВт с номинальным 14 В и током возбуждения до 7 А. Диапазон рабочих температур регулятора -40...+120 °С.

Схема включения регулятора напряжения в бортовую СЭС автомобиля представлена на рис. 1.24.

Основные электрические параметры данного регулятора и его функциональные возможности следующие:

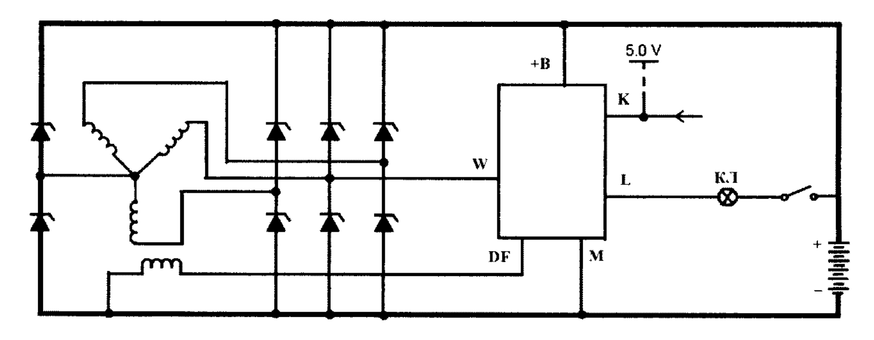


Рис. 1.24. Схема включения регулятора напряжения 7940.3702 в СЭС

– напряжение настройки при частоте вращения вала генератора 6000 мин$^{-1}$, токе нагрузки 5 А при подключённой аккумуляторной батарее со степенью заряженности не менее 75 % при нормальных значениях климатических факторов внешней среды по ГОСТ Р 52230—2004 не превышает (14,7 ± 0,15) В;

– точность поддержания регулируемого напряжения ± 0,1 В при изменении частоты вращения вала генератора в пределах 2000—5000 об/мин в тех же условиях внешней среды;

– точность поддержания регулируемого напряжения ±0,25 В при изменении тока нагрузки в пределах 0,1I н max — 0,9I н max в тех же условиях внешней среды;

– регулируемое напряжение при отключённой аккумуляторной батарее при частоте вращения ротора генератора 7500 об/мин и токе нагрузки 5 А не превышает 17 В;

– при включенном замке зажигания и частоте вращения вала генератора до 500 об/мин время включённого состояния транзистора составляет не более 25 % всего периода коммутации, что обеспечивает более благоприятные условия для пуска двигателя внутреннего сгорания и уменьшает ток разряда аккумуляторной батареи;

– при частоте вращения вала генератора до 500 об/мин, с помощью контрольной лампы обеспечивается индикация пониженных оборотов;

– при частоте вращения вала генератора более 500 об/мин и напряжении в бортовой сети выше 16,4 В с помощью контрольной лампы обеспечивается индикация о повышенном уровне напряжения;

– при частоте вращения вала генератора более 500 об/мин и напряжении в бортовой сети ниже 11,96 В с помощью контрольной лампы обеспечивается индикация о пониженном уровне напряжения;

– обеспечивается защита выходного каскада цепи обмотки возбуждения при достижении током возбуждения 15—20 А;

– обеспечивается продолжительное выключение выходного транзистора при достижении температуры корпуса регулятора 160 °С;

– регулятор напряжения устойчив к воздействиям напряжения обратной полярности не более 2,5 В и временем не более 5 с.

Как видно из рис. 1.24, регулятор напряжения 7940.3702 не требует дополнительных трех диодов выпрямительного моста. Включение внутренней измерительной цепи регулятора непосредственно на вывод «плюс» генераторной установки позволяет улучшить качество выходного напряжения, а появляющийся в этом случае ток разряда аккумуляторной батареи на входные цепи регулятора незначителен.

На рис. 1.25 представлена принципиальная электрическая схема регулятора напряжения 7940.3702. Рассмотрим его принцип действия.

Как видно из схемы, регулятор напряжения выполнен с применением двух микросхем: *DA1* — микроконтроллер, *DA2* — модулятор ширины импульсов. Алгоритм работы *DA1* определяется программно. Алгоритм работы микросхемы D*A2* (КБ1047ЕУ14(15)) определяется внутренней структурой, аналогичной микросхеме КР1033ЕУ10, описанной в [10].

Значение напряжения в бортовой сети стабилизируется на требуемом уровне посредством регулирования тока возбуждения генератора. Значение тока в обмотке возбуждения определяется временем включенного состояния транзистора *VT6* за период его коммутации.

Транзистор *VT6* типа IRFC024NB — *N*-канальный полевой транзистор с индуцированным каналом. Транзистор *VT6* начинает открываться, если потенциал его затвора больше потенциала истока на пороговое значение напряжения: $U_{з.и} > 4$ В. Для полного открытия *VT6* рекомендуется обеспечить напряжение затвор-исток в диапазоне $U_{з.и}$ = 10—15 В в зависимости от коммутируемого тока. Если потенциалы затвора и истока приблизительно равны, то *VT6* будет закрыт. Как известно, при управлении полевыми транзисторами для минимизации потерь в них при коммутации также важно обеспечить быстрый заряд и быстрый разряд емкости перехода затвор-исток. Все упомянутые требования по управлению *VT6* обеспечиваются схемой предва-

рительного усилителя мощности (драйвера), выполненного на транзисторах *VT4*, *VT5*, диоде *VD5*, конденсаторе *C7*, резисторах *R18*, *R19*.

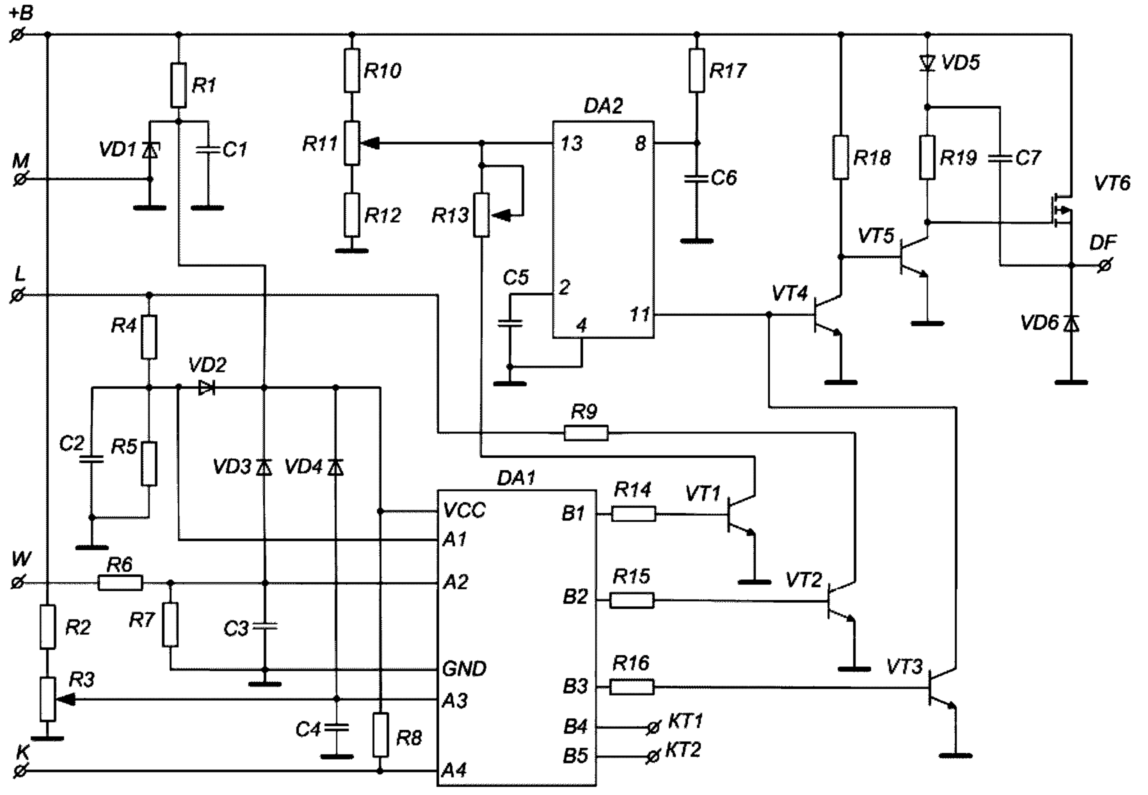


Рис. 1.25. Принципиальная электрическая схема регулятора напряжения 7940.3702

Пока транзистор *VT4* закрыт, транзистор *VT5* открыт, так как имеется контур (+В, *R18*, переход база-эмиттер *VT5*, масса — «М») для протекания отпирающего базового тока. Транзистор *VT6* при этом будет закрыт, так как *VT5* подключает затвор *VT6* на анод диода VD*6*, катод которого соединен с истоком *VT6*, и следовательно, потенциал затвора не может оставаться выше потенциала истока более чем, на прямое падение напряжения на диоде и открытом переходе коллектор-эмиттер *VT5* (в сумме < 1 В). Конденсатор *C7* заряжается в этих условиях до напряжения бортовой сети за вычетом прямого падения напряжения на диоде *VD5* (в результате > 10 В).

Когда транзистор *VT4* открывается, *VT5* закрывается и напряжение конденсатора *C7* через резистор *R19* прикладывается к выводам затвор-исток *VT6*, не значительно разряжая конденсатор *C7*, внутренняя емкость затвор-исток *VT6* при этом заряжается до напряжения >10 В, что приводит к полному открытию транзистора *VT6*.

Импульсы управления транзистором *VT4* формируются микросхемами *DA1* и *DA2* совместно. *DA2* формирует импульсы управления аппаратно, учитывая при этом лишь величину рассогласования напряжения уставки и напряжения сигнала обратной связи. Сигнал уставки формируется источником опорного напряжения, размещенным внутри *DA2*. Сигнал обратной связи, пропорциональный текущему значению напряжения в бортовой сети, формируется на выводе 13 с помощью делителя напряжения на резисторах *R10*, *R12* и потенциометре *R11*. Делитель выполняет, по сути, роль датчика напряжения бортовой сети для *DA2*.

Работа микросхемы *DA1* определяется состоянием ключа зажигания, текущей частотой вращения вала генератора и текущим значением напряжения в бортовой сети автомобиля. Алгоритмы работы *DA1* в виде блок схем представлены на рис. 1.26. и 1.27.

Пока ключ зажигания не замкнут, на входе *L* регулятора напряжения и, следовательно, на входе *A1 DA1* будет присутствовать низкий уровень напряжения, соответствующий логическому «0». Выход *B3 DA1* будет при этом постоянно включен, что обеспечит постоянно выключенное состояние *VT6*.

После замыкания ключа зажигания на выходе *B2* устанавливается напряжение, соответствующее уровню логической единицы, включается транзистор *VT2*, что приводит к загоранию контрольной лампы КЛ (см. рис. 1.24). Далее, на входе *A2* измеряется частота фазного

напряжения и в случае, если она меньше 50 Гц, что соответствует ча-
с т о -

Замыкание
выключателя массы
Подача питания от АБ
Запуск DA1

Установка выходов
B1=0; B2=0; B3=1

Проверка вкл.
ключа зажигания
вход
A1=?

0

1

Включение КЛ
B2=1

Измерение частоты
фазного напряжения
вход A2

Пауза 1 мс

B3=0

Пауза 3 мс

B3=1

Частота фаз.
напр.
> 50 Гц

НЕТ

ДА

Выключение КЛ
B2=0

Начало

Конец

АЛГОРИТМ 1

Начало

Конец

АЛГОРИТМ 2

Рис. 1.26. Алгоритмы работы микроконтроллера *DA1*

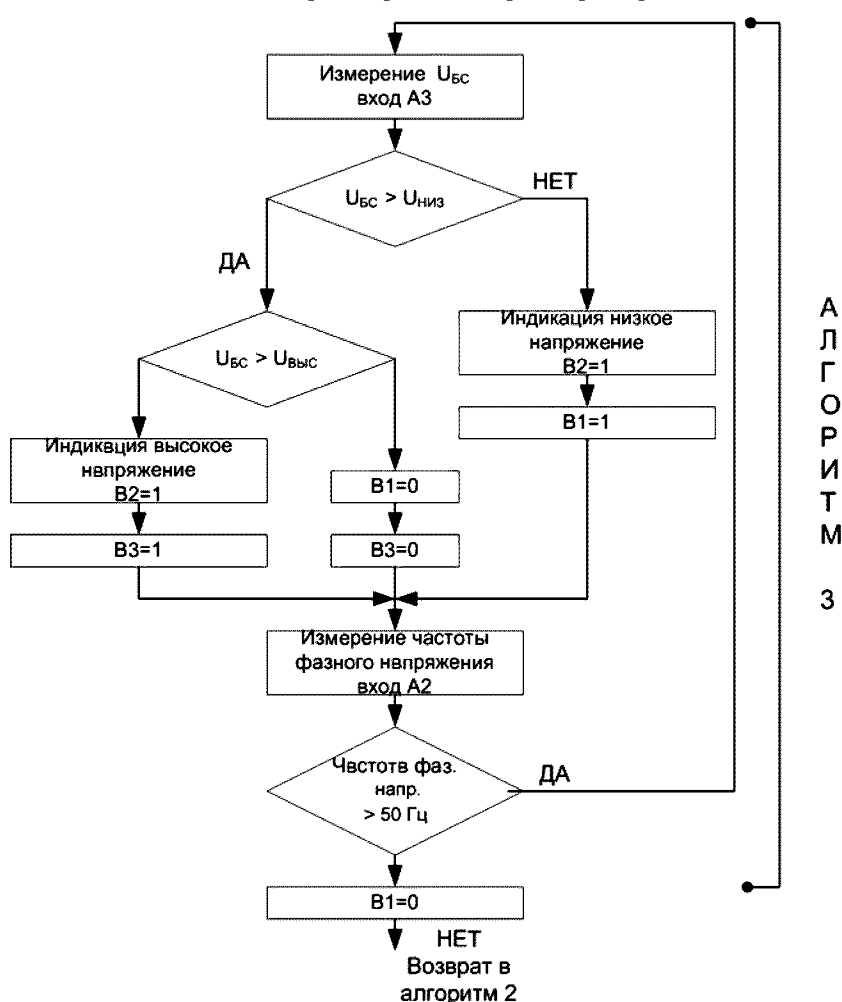


Рис. 1.27. Алгоритмы работы микроконтроллера *DA1*

те вращения вала генератора менее 500 об/мин, время включения транзистора *VT6* ограничивается 1 мс при периоде 4 мс с помощью транзистора *VT*3. Микросхема *DA2* при данных условиях включила бы *VT4* и, следовательно, *VT6* с максимальным коэффициентом заполнения импульса, что не было бы оптимально, так как при малых оборотах напряжение в бортовой сети не достигло бы номинального,

а разряд аккумулятора был бы более интенсивным. Таким образом, *DA1* позволяет, используя выход *B3*, посредством транзистора *VT3* выключать транзистор *VT4* независимо от сигнала с *DA2*.

После того, как обороты вала генератора превысят 500 об/мин, контрольная лампа КЛ выключается, и микросхема *DA1* переходит к работе по алгоритму 3. В данном алгоритме проверяется, находится ли напряжение бортовой сети в допустимых пределах $U_{низ} < U_{БС} < U_{выс}$, где $U_{низ}$ и $U_{выс}$ — уровни индикации низкого и высокого напряжения, соответственно. Если напряжение в норме, контрольная лампа не го-рит, если напряжение не в норме, то она включается. Если напряжение низкое, то *DA1* через выход *B1* включает транзистор *VT1*, шунтируя резистором *R13* «нижнюю» часть датчика регулируемого напряжения, уменьшая тем самым величину сигнала обратной связи, поступающего на *DA2*, что в итоге приводит к увеличению тока возбуждения генератора. Если же напряжение высокое, то включается *VT3*, что приводит к уменьшению тока возбуждения.

Назначение остальных компонентов, приведенных на принципиальной схеме и не упомянутых выше, следующее.

Микросхема *DA1* питается стабильным напряжением от параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на стабилитроне *VD1* и резисторе *R1*. Конденсатор *C1* является фильтром, сглаживающим возможные кратковременные провалы и всплески напряжения, передаваемые через *R1* с выхода выпрямителя генератора (шина +В) на *VD1*.

Резистор *R2* и потенциометр *R3*, а также резисторы *R4—R5*, *R6—R7* образуют делители напряжения, необходимые для согласования уровней сигналов, контролируемых на входах +В, *L*, *W* регулятора напряжения, с допустимым уровнем логической единицы на входах *A1—A3* микроконтроллера *DA1*. Конденсаторы *C2—C4* — фильтрующие, они необходимы для защиты входов *A1—A3* микросхемы *DA1* от кратковременных всплесков напряжения, превышающих допустимый уровень логической единицы. Если же уровни напряжения на входах +В, *L*, *W* длительно сохраняются повышенными, например, при переходных процессах в системе генерирования защиту входов *A1—A3* от превышения напряжения обеспечивают диоды *VD2—VD4*. Диоды открываются и напряжение на входах *A1—A3* превышает напряжение питания *DA1* лишь на величину падения напряжения на открытом диоде (0,4—0,8 В), что вполне допустимо для входов *DA1*.

При этом избыточное напряжение на входах +B, *L*, *W* падает на резисторах *R4*, *R6*, *R2* и «верхней» части потенциометра *R3*.

Резисторы *R14—R16* обеспечивают требуемое значение отпирающего тока базы транзисторов *VT1—VT3*, когда на выходах *B1—B3* появляется напряжение, соответствующее уровню логической единицы.

Диод *VD6* — шунтирующий диод обмотки возбуждения.

В настоящее время в России и за рубежом ведутся широкомасштабные работы, направленные на решение одной из наиболее актуальных проблем современности — снижению загрязнения окружающей среды автотранспортными средствами.

Эксплуатационные исследования показывают [11], что увеличение силы максимального тока генераторной установки на 20 А приводит к повышению расхода топлива двигателя на холостом ходу на 15—20 %, а при работе в городских условиях время работы двигателя на холостом ходу составляет 40—50 % общего времени эксплуатации. Кроме того, при работе генераторной установки на максимальную нагрузку на холостом ходу двигателя, когда мощность, вырабатываемая генератором, максимальна, двигатель может работать с перебоями, что вызывает значительное увеличение токсичности отработавших газов.

Существенная роль в решении проблемы снижения загрязнения окружающей среды автотранспортными средствами отводится разрабатываемым в настоящее время и активно внедряемым на автомобили интеллектуальным системам электроснабжения, позволяющим оптимизировать алгоритмы взаимодействия основных их компонентов — генератора и аккумуляторной батареи, что, в свою очередь, способно обеспечить снижение выбросов вредных веществ и расхода топлива двигателя автомобиля.

Реализованные в интеллектуальных системах электроснабжения оптимальные алгоритмы работы обеспечивают снижение токсичности отработавших газов двигателя и расхода топлива на привод генераторной установки, стабильность напряжения в бортовой сети и заданное зарядное состояние аккумуляторной батареи.

Интеллектуальные СЭС не просто ограничивают напряжение генератора на определённом уровне при изменении частоты вращения его вала и электрической нагрузки, но и корректируют напряжение настройки регуляторов напряжения в зависимости от зарядного состояния батареи и режимов эксплуатации. Кроме того, управляющие устройства интеллектуальных СЭС могут воздействовать на устройства, не входящие в систему. Например, при включении мощных по-

требителей электроэнергии частота холостого хода двигателя принудительно увеличивается для исключения разряда аккумуляторной батареи.

Контрольные вопросы

1. Каково содержание понятий системы электрооборудования, системы электроснабжения и системы генерирования электроэнергии?
2. Сформулируйте наиболее важные требования, предъявляемые к автомобильному электрооборудованию и перечислите пути их практической реализации.
3. Какие качества синхронных генераторов с когтеобразными роторами обусловили столь широкое применение их в СЭС автомобилей?
4. Перечислите и обоснуйте преимущества вентильных генераторов перед генераторами постоянного тока традиционного исполнения.
5. В чём состоит принципиальное отличие магнитных систем индукторных генераторов от магнитных систем других синхронных генераторов?
6. В чём конкретно состоит отличие внешних и регулировочных характеристик генераторов с независимым и параллельным возбуждением?
7. Опасен ли режим длительного короткого замыкания для проводов сети при одиночной работе генератора параллельного возбуждения?
8. Сопоставьте потери в обмотках возбуждения в генераторах с электромагнитным и комбинированным возбуждением.
9. Раскройте содержание понятия «качество электроэнергии». Какие средства используются для обеспечения требуемого качества электроэнергии в автомобильных генераторных установках?
10. Каковы причины возникновения пульсаций напряжения на нагрузке в СЭС с коллекторными генераторами постоянного тока и с вентильными генераторами?
11. Назовите наиболее эффективные пути уменьшения пульсаций напряжения в СЭС автомобилей.
12. Влияет ли на величину пульсаций напряжения аккумуляторная батарея?
13. Каким образом определяется мощность генератора переменного тока, необходимая для обеспечения требуемого значения мощности на нагрузке?
14. В силу каких причин в СЭС автомобилей не применяются генераторы с возбуждением от постоянных магнитов?
15. С какой целью в СЭС автомобилей обязательно вводится аккумуляторная батарея?
16. Приведите примеры и укажите причины возникновения аварийных режимов работы автомобильных генераторных установок.
17. Используя внешние характеристики генератора и АБ, постройте кривую распределения токов между ними в зависимости от тока нагрузки.
18. Обоснуйте необходимость введения в СЭС регуляторов напряжения.
19. Перечислите причины возможного разряда АБ при неисправной генераторной установке или ее привода?

20. Поясните принцип работы регулятора напряжения с переменной частотой коммутации транзистора в цепи возбуждения. Воспроизведите кривую изменения во времени тока в обмотке возбуждения.
21. Обоснуйте необходимость введения в структурную схему регулятора напряжения каждого из образующих её элементов.
22. Объясните назначение диода *VD5* в схеме регулятора напряжения 7940.3702.
23. Объясните процессы в схеме регулятора напряжения 7940.3702 при разных алгоритмах работы микроконтроллера *DA1*, используя принципиальную схему регулятора напряжения.
24. Объясните, о чем может сигнализировать горящая контрольная лампа в схеме регулятора напряжения на рис. 1.22.

2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОГО ПУСКА АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. Пусковые качества и рабочие характеристики автотракторных двигателей

Запуск двигателей внутреннего сгорания является подготовительным этапом, предшествующим началу их самостоятельной работы. В процессе пуска коленчатый вал двигателя под воздействием момента от специально предусмотренных для его привода пусковых устройств вращается с возрастающей во времени частотой вращения, в результате чего при определённой для каждого типа двигателей частоте вращения (так называемой минимальной частоте вращения) в его цилиндрах создаются условия для начала и развития процессов образования, воспламенения и сгорания топливовоздушной смеси и перехода двигателя на устойчивый режим самостоятельной работы.

Возможность осуществления надёжного пуска двигателя зависит от многих конструктивных и эксплуатационных факторов [1], к которым относят степень сжатия рабочей смеси в цилиндрах, рабочий объём, число и схему расположения цилиндров, тепловое состояние деталей двигателя, регулировочные параметры системы зажигания (для бензиновых двигателей) и топливной аппаратуры, низкотемпературные свойства топлива, вязкостно-температурные характеристики моторного масла, мощность и энергоёмкость системы пуска, наличие и эффективность вспомогательных пусковых устройств.

В дизелях топливовоздушная смесь образуется непосредственно в цилиндрах после подачи топлива форсункой. Воспламенение смеси происходит под действием высокой температуры в камере сгорания. Вследствие малой продолжительности процесса смесеобразования и отсутствия принудительного зажигания топливовоздушной смеси пуск дизелей осуществить сложнее. Достаточные для топливовоздушной смеси давление и температура в цилиндрах дизелей достигается благодаря бóльшей, чем у бензиновых двигателей, степени сжатия и более высокой частоте вращения коленчатого вала пусковым устройством.

Вращая коленчатый вал двигателя, пусковое устройство преодолевает сопротивление трения в кинематических парах. При этом обеспечиваются наполнение цилиндров, удаление рабочего заряда или продуктов сгорания, компенсация работ сжатия и расширения и привод вспомогательных механизмов.

Затратами энергии системы пуска на наполнение цилиндров и удаление продуктов сгорания при пуске вследствие их малости по сравнению с затратами её на преодоление момента сопротивления сил трения $M_{т.ср}$ и момента сопротивления газовых сил $M_{г.ср}$, обусловленного разностью работ сил сжатия и расширения, можно пренебречь. По этой же причине можно пренебречь и затратами энергии на привод вспомогательных механизмов. При этих допущениях средний момент сопротивления [5]:

$$M_{с.ср} = M_{т.ср} + M_{г.ср}. \qquad (2.1)$$

Средний момент сил трения в двигателе складывается из составляющих от моментов сил трения поршня, поршневых колец, в коренных и шатунных подшипниках коленчатого вала, поршневого пальца во втулке верхней головки шатуна и в других трущихся парах. Доля каждой составляющей в среднем моменте сопротивления меняется с изменениями частоты вращения коленчатого вала, вязкости моторного масла, а также зависит от конструкции двигателя и динамики прокручивания его коленчатого вала пусковым устройством.

Пока топливо в цилиндрах не воспламеняется, работа сил сжатия больше работы сил расширения. Потери на теплопередачу в холодные стенки цилиндра обусловливают момент сопротивления, который зависит от степени сжатия, формы и размеров камеры сгорания, материала, температуры и технического состояния деталей цилиндропоршневой группы.

Средний момент сопротивления газовых сил увеличивается с уменьшением частоты вращения коленчатого вала, увеличением вязкости масла и степени сжатия.

При вязкостях масла, соответствующих предельным температурам надёжного пуска автотракторных двигателей, основную долю (0,6—0,95) среднего момента сопротивления составляет момент сил трения в кинематических парах двигателя. Относительная доля момента сил трения возрастает с увеличением частоты вращения коленчатого вала и вязкости масла.

Вследствие бóльшей степени сжатия доля момента газовых сил в среднем моменте сопротивления у дизелей больше, чем у карбюраторных двигателей.

Для оценки величины среднего момента сопротивления $M_{с.ср}$ бензиновых двигателей используется выражение [5]

$$M_{\text{с.ср}} = \rho_{\text{т}} V_h / \pi \tau_{\text{д}} , \quad (2.2)$$

где $\tau_{\text{д}}$ — количество тактов рабочего цикла двигателя; V_h — рабочий объём цилиндров двигателя; $\rho_{\text{т}}$ — среднее давление трения.

Среднее давление трения $\rho_{\text{т}}$ представляет собой условную удельную величину, характеризующую сопротивление вращению коленчатого вала двигателя, укомплектованного всеми штатными навесными агрегатами, и равную отношению силы трения к площади поршня.

Для бензиновых двигателей при вязкости моторного масла $V_{-1} = (1—20)^3$ 10 мм^2/с и средних частотах вращения коленчатого вала $n_{\text{ср}}$ = 50—150 мин получены следующие экспериментальные зависимости для определения $\rho_{\text{т}}$:

$$\rho_{\text{т}} = \left(4,9 + 0,04 n_{\text{ср}}\right) \quad (2.3)$$

при числе цилиндров $z_{\text{ц}} < 6$ и

$$\rho_{\text{т}} = \left(3,5 + 0,027 n_{\text{ср}}\right) \quad (2.4)$$

при числе цилиндров $z_{\text{ц}} = 8$.

Представление о характере изменения среднего момента сопротивления от частоты вращения коленчатого вала бензиновых двигателей и дизелей можно получить, ознакомившись с рис. 2.1 и 2.2 [2].

При оценке и сопоставлении пусковых качеств двигателей используется совокупность следующих параметров.

Минимальная пусковая частота вращения $n_{\min}$ — наименьшая частота вращения коленчатого вала двигателя, при которой его пуск в заданных условиях происходит за две попытки пуска продолжительностью по 10 с для бензиновых двигателей и по 15 с — для дизелей с перерывами между попытками в 1 мин.

Минимальные пусковые частоты определяются по зависимостям времени пуска t от средней частоты вращения коленчатого вала (рис. 2.3). Требуемые пусковые частоты для автомобильных бензиновых двигателей — 40÷85 мин, а для дизелей — 50÷200 мин. Минимальные пусковые частоты увеличиваются с понижением температуры, увеличением вязкости масла и заметно снижаются при увеличении числа цилиндров двигателя и использовании устройств для облегчения пуска.

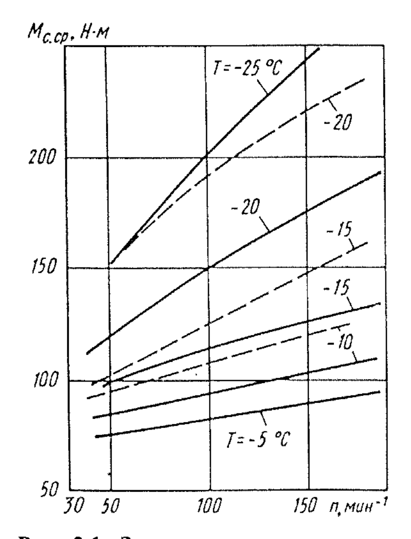


Рис. 2.1. Зависимость среднего момента сопротивления $M_{c.ср}$ бензинового двигателя от частоты вращения n при различных температурах

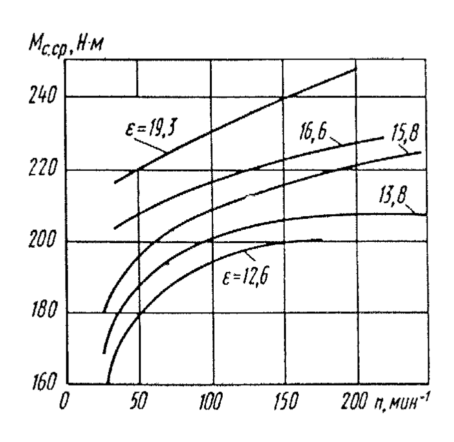


Рис. 2.2. Зависимость среднего момента сопротивления $M_{c.ср}$ дизеля при различных значениях степени сжатия ε от частоты вращения n при температуре –10 °С

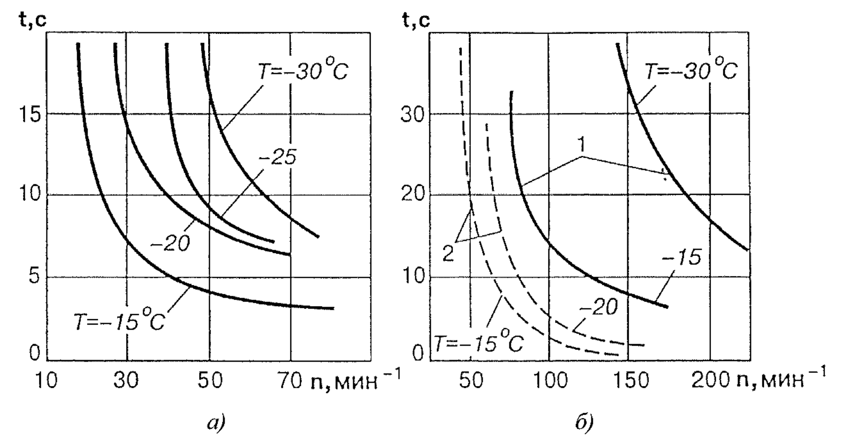


Рис 2.3. Зависимость времени пуска *t* от средней частоты вращения коленчатого вала:

а для бензиновых двигателей; *б* для дизелей

Предельная температура надёжного пуска — наиболее низкая температура окружающего воздуха, при которой осуществляется надёжный пуск холодного двигателя. Под надёжным пуском понима-

ется пуск двигателя, оборудованного всеми навесными агрегатами, на основном топливе, при использовании штатных аккумуляторных батарей, имеющих 75 %-ную степень заряженности, не более чем за три попытки пуска холодного двигателя и не более чем за две попытки пуска горячего двигателя или после предпускового подогрева.

Холодный двигатель — двигатель, температура деталей, охлаждающей жидкости, масла и топлива которого отличаются от температуры окружающего воздуха не более чем на 1 °С.

Горячий двигатель — двигатель, остановленный после работы, при температуре окружающего воздуха до +45 °С и температуре деталей двигателя, охлаждающей жидкости и масла не ниже рабочей температуры.

Время подготовки двигателя к принятию нагрузки — затраты времени на приведение в действие и работу устройства для облегчения пуска холодного двигателя или системы предпускового подогрева, на пуск двигателя и его работу в режиме холостого хода до достижения состояния, обеспечивающего принятие нагрузки. Для отечественных карбюраторных двигателей нормированное время подготовки двигателя к принятию нагрузки при температурах окружающего воздуха +45 °С, –20 и –30 °С не должно превышать соответственно 3, 8 и 10 мин.

Пусковая мощность — мощность пускового устройства, обеспечивающая надёжный пуск двигателя. Пусковая мощность определяется по минимальной пусковой частоте вращения и соответствующему ей среднему моменту сопротивления двигателя:

$$P_{\text{дв.п}} = 2\pi \text{M}_{\text{с.ср}} n_{\min} / 60. \qquad (2.5)$$

С учётом выражения [2]

$$P_{\text{дв.п}} = V_h \rho_{\text{т}} n_{\min} / 30. \qquad (2.6)$$

Для пуска автотракторных двигателей используются несколько типов различных по принципу действия и структуре основных и вспомогательных систем: механическая с ручным пружинным стартером; пневматическая с пневмостартером; электроинерционная с маховиком, раскручиваемым электродвигателем до частот вращения, обеспечивающих необходимый для запуска двигателя запас кинетической энергии и электростартерный, функции пускового устройства в котором выполняет электродвигатель, связанный механической передачей с коленчатым валом двигателя и получающий питание от аккумуляторной батареи.

Преимущественное применение на транспортных средствах с двигателями внутреннего сгорания получили электростартерные системы

пуска. Эти системы надёжны в работе, в широком диапазоне мощностей имеют лучшие массогабаритные показатели по сравнению с другими системами пуска, обеспечивают возможность дистанционного управления процессом пуска и его автоматизации.

2.2. Устройство и технические характеристики электростартеров

С составом систем электростартерного пуска (СЭП), электрическими и механическими связями между её элементами, их устройством и взаимодействием в процессе пуска двигателей можно ознакомиться, обратившись к рис. 2.4—2.7.

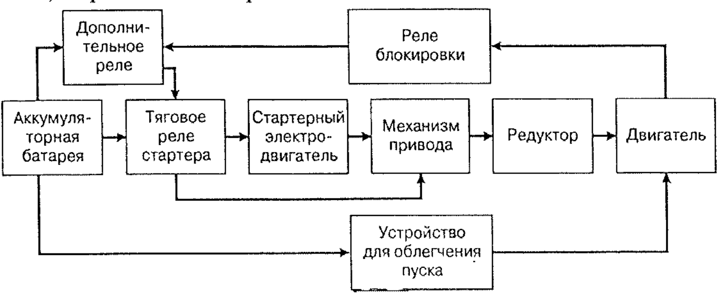


Рис. 2.4. Структурная схема типовой системы электростартерного пуска автотракторных двигателей [1]

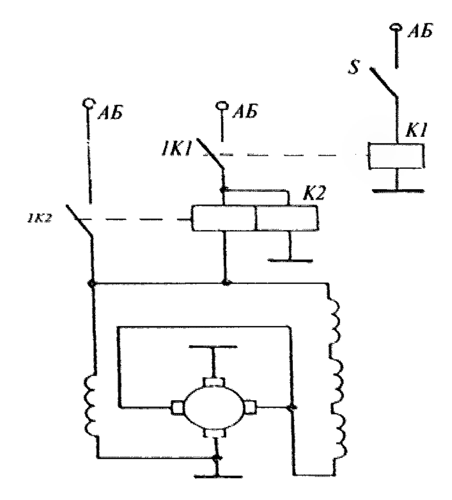


Рис. 2.5. Упрощенная электрическая схема управления пуска двигателя

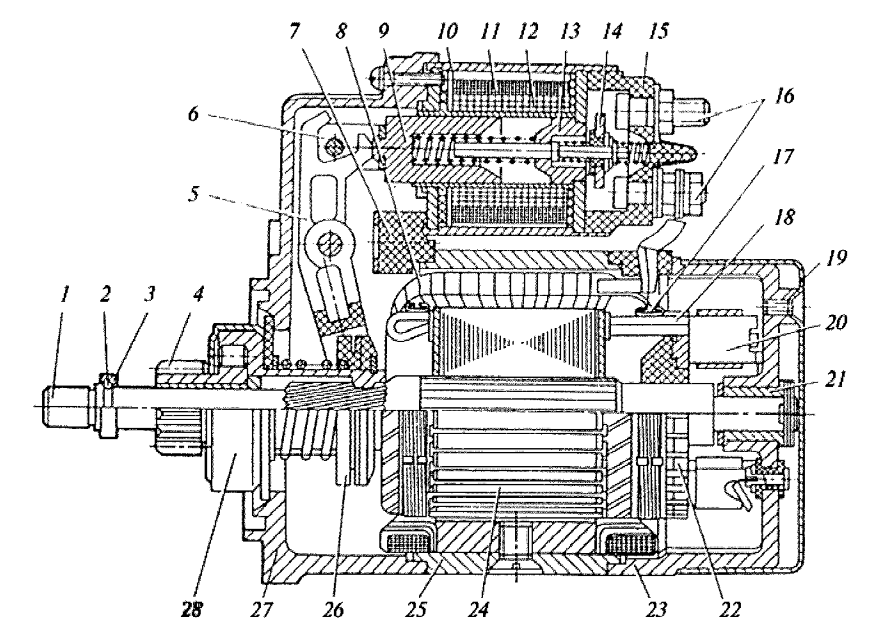


Рис. 2.6. Электростартер 29.3708 с одной опорой в крышке со стороны коллектора [6]:
1 — вал якоря; *2* — замковое кольцо; *3* — упорное кольцо; *4* — шестерня привода; *5* — рычаг привода; *6* — тяговое реле; *7* — уплотнительная заглушка; *8* — катушка обмотки возбуждения; *9* — якорь тягового реле; *10* — корпус тягового реле; *11* — удерживающая обмотка; *12* — втягивающая обмотка; *13* — сердечник тягового реле; *14* — подвижный контакт; *15* — крышка тягового реле; *16* — контактные болты; *17* — бандаж лобовой части обмотки якоря; 18 — обмотка якоря; *19* — защитный кожух; *20* — щетка; *21* — вкладыш подшипника; *22* — торцовый коллектор; *23* — крышка со стороны коллектора; *24* — якорь электродвигателя; *25* — корпус; *26* — поводковая муфта; *27* — крышка со стороны привода; *28* — роликовая муфта свободного хода

На этих рисунках в порядке их следования приведены структурная схема типовой системы электростартерного пуска, упрощённая электрическая схема управления процессом пуска и два варианта конструктивного исполнения электростартеров, отличающихся друг от друга устройством тяговых реле, числом опор для фиксации вала электродвигателя и конструктивным оформлением крышек и щёточно-коллекторных узлов электродвигателей. В электродвигателе стартера 29.3708 (см. рис. 2.6) рабочая поверхность коллектора перпендикулярна оси вала электродвигателя (коллектор торцевого типа), а в электродвигателе стартера СТ221 (см. рис. 2.7) рабочая поверхность

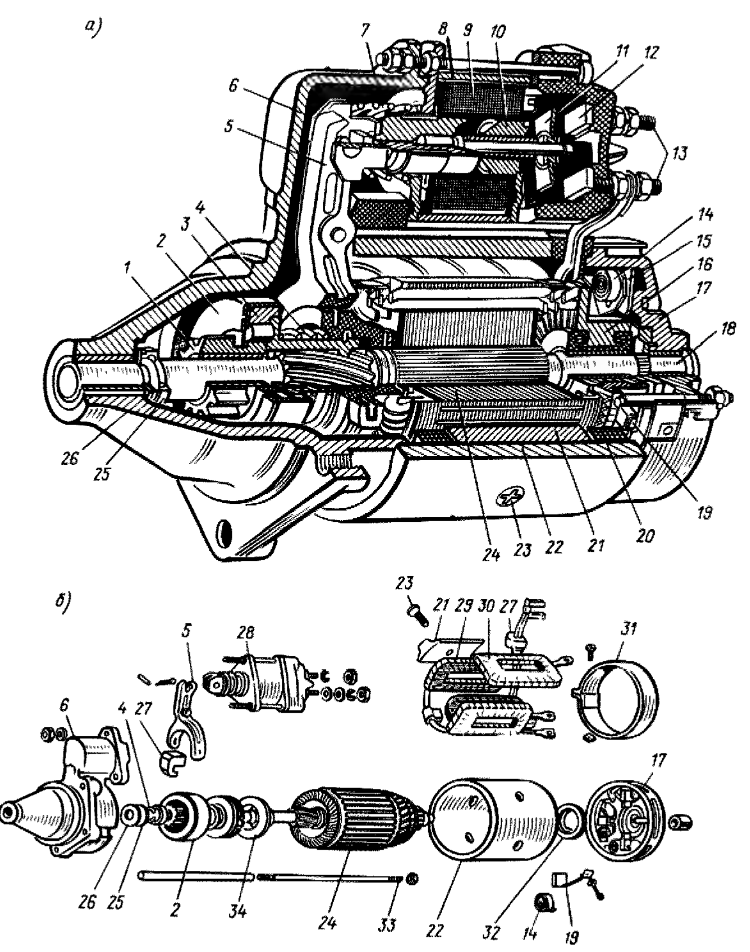


Рис. 2.7. Электростартер СТ221 [7]:

а — общий вид; *б* — детали стартера: *1* — шестерня привода; *2* — муфта свободного хода; *3* — ведущая обойма муфты свободного хода; *4* — буферная пружина; *5* — рычаг включения привода; *6* — крышка со стороны привода; *7* — возвратная пружина; *8* — корпус тягового реле; *9* — обмотка тягового реле; *10* — сердечник тягового реле; *11* — подвижная тяговая пластина; *12* — неподвижный контакт; *13* — контактные болты; *14* — щеточная пружина; *15* — щеткодержатель; *16* — коллектор; *17* — крышка со стороны коллектора; *18* — вал якоря с винтовыми шлицами; *19* — щетка; *20* — катушки обмотки возбуждения; *21* — полюс; *22* — корпус стартера; *23* — полюсный винт; *24* — якорь электродвигателя; *25* — упорное кольцо; *26* — регулировочная шайба; *27* — резиновые заглушки; *28* — тяговое реле; *29* — последовательная обмотка возбуждения; *30* — параллельная обмотка возбуждения; *31* — защитная лента; *32* — тормозной диск; *33* — стяжная шпилька; *34* — ограничитель хода шестерни

охватывает эту ось (цилиндрический коллектор). Валы обоих стартеров устанавливаются на двух опорах (бронзографитовых подшипниках). В стартере СТ221 опоры выполнены в крышках стартера, а в стартере 29.3708 только одна опора выполнена в крышке стартера (со стороны якоря). Вторая опора для фиксации противоположного конца вала расположена в картере сцепления.

В стартерах с диаметром корпуса 115 мм и более вал якоря устанавливается на трёх опорах. Третья промежуточная опора в виде диска из чугуна, стали или алюминиевого сплава устанавливается между корпусом и передней крышкой и крепится к передней крышке.

Источником энергии, обеспечивающим функционирование системы пуска, является аккумуляторная батарея.

После перевода выключателя стартера *S* (см. рис. 2.5) в положение, соответствующее пуску двигателя, к аккумуляторной батарее подключается сначала дополнительное реле *K1*, а затем по его команде — тяговое реле *K2* (на рис. 2.6 элементы конструкции этого реле обозначены позициями *6*, *9—12*, *14—16*). Тяговое реле имеет две обмотки: втягивающую *12* и удерживающую *11*. При замыкании контакта *1K1* дополнительного реле обе обмотки тягового реле подключаются к аккумуляторной батарее, их МДС действуют согласно и, если напряжение на этих обмотках не ниже 9 В для 12-вольтовых и 18 В для 24-вольтовых стартеров, тяговое реле срабатывает и замыкает свои контакты *1K2*, подключая тем самым стартерный электродвигатель к аккумуляторной батарее. Ток к электродвигателю поступает по проводу, соединяющему плюсовую клемму АБ с контактной группой, образованной закреплёнными на якоре реле *9* подвижными контактами *14* и на его крышке *15* контактными болтами *16*. Втягивающая обмотка *12* после замыкания контакта *1K2* замыкается накоротко, и удержание этого контакта в замкнутом состоянии обеспечивается только одной удерживающей обмоткой *11*. Согласно требованиям, предъявляемым к системам электростартерного пуска, эта обмотка должна обеспечивать удержание подвижных контактов *14* в замкнутом состоянии при снижении напряжения на ней до 4 В для 12-вольтовых стартеров и до 8 В для 24-вольтовых стартеров.

Якорь *9* тягового реле через шток *6* и рычаг *5* механически связан с установленным на валу электродвигателя механизмом привода, образованным в рассматриваемой конкретной конструкции электростартера поводковой муфтой *26*, роликовой муфтой свободного хода *28* и шестерней привода *4*. Муфты свободного хода стартеров предот-

вращают возможность механических повреждений якоря электродвигателя при частотах вращения вала *1*, близких к частотам вращения холостого хода. Они передают усилие с вала электродвигателя к шестерне привода *4* только при неработающем двигателе и проскальзывают после выхода его на самостоятельный режим работы, когда частота вращения коленчатого вала, приведённая к валу электродвигателя, превышает его частоту вращения.

Введение в приводные устройства стартеров муфт свободного хода позволяет не выключать стартер до тех пор, пока не начнут работать все цилиндры двигателя, т. е. осуществить пуск с одной попытки стартования, сократить число включений стартера и снизить расход энергии аккумуляторной батареи.

Используемые в рассматриваемых стартерах роликовые муфты свободного хода характеризуются бесшумностью работы, технологичностью в изготовлении и способностью при относительно небольших размерах передавать значительные моменты. Они не требуют ухода и регулирования в эксплуатации, малочувствительны к загрязнению.

Наряду с роликовыми в электростартерах используются храповичные муфты свободного хода. Достоинством их является высокая прочность и ремонтопригодность.

Перемещение якоря тягового реле *9* после подключения его к аккумуляторной батарее в сторону неподвижного сердечника *13* вызывает поворот рычага привода *5* и, как следствие, перемещение всех конструктивных элементов механизма привода вдоль оси вала. При этом, если при подходе шестерни к венцу маховика перед её зубцом располагается впадина зубчатой поверхности маховика, то шестерня беспрепятственно входит в зацепление с маховиком. Причём происходит это до момента соприкосновения подвижного контакта *14* тягового реле с контактными болтами *16*. Если же перед зубцом шестерни в том же её положении располагается зубец маховика, то осевое перемещение привода прекращается, рычаг привода *5* через поводковую муфту *26* сжимает буферную пружину (рис. 2.8) и шестерня привода входит в зацепление с маховиком после подключения электродвигателя АБ и поворота его якоря, а следовательно, и шестерни на угол, при котором ось её зубца совпадёт с осью ближайшей к нему впадины венца маховика. Необходимое для введения шестерни в зацепление усилие обеспечивает разжимающаяся буферная пружина. Для облегчения входа шестерни в зацепление торцы её зубьев и зубьев венца маховика выполнены со скосом.

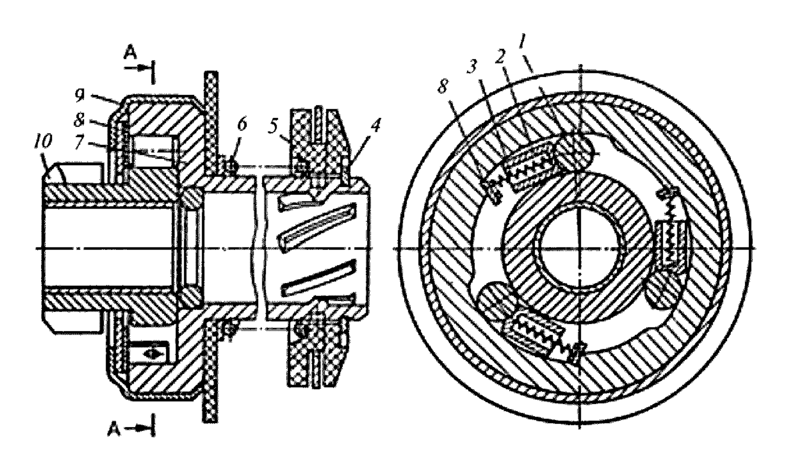


Рис. 2.8. Роликовая муфта свободного хода стартера 29.3708:
1 — ролик; *2* — толкатель; *3* — прижимная пружина; *4* замковое кольцо; *5* — поводковая муфта; *6* — буферная пружина; *7* — наружная ведущая обойма; *8* — держатель пружин; *9* — кожух муфты; *10* — ведомая обойма с шестерней

Принцип передачи момента в одном направлении роликовой муфтой стартера 29.3708 реализован размещением роликов в сужиающихся в направлении вращения вала клиновидных полостях (см. рис. 2.8). В момент включения стартера, когда шестерня привода ещё неподвижна, а якорь стартерного электродвигателя с направляющей втулкой и обоймой муфты начинают вращаться, ролики под действием прижимных пружин и сил трения между роликами и соприкасающимися с ними поверхностями обоймы муфты и хвостовика шестерни перемещаются в суженое пространство полостей и заклинивают муфту. Направляющая втулка с обоймой и шестерня с этого момента вращаются как одно целое и передают момент от стартера к двигателю.

После пуска двигателя шестерня, находясь в зацеплении с зубчатым венцом маховика, вращается с частотой, бóльшей частоты вращения вала якоря при холостом ходе. При этом хвостовик шестерни смещает ролики в сторону плунжеров, т.е. в расширенное пространство между хвостовиком шестерни и обоймой. Ролики освобождаются, и шестерня начинает вращаться независимо от обоймы направляющей втулки с частотой, равной частоте вращения коленчатого вала двигателя (с учётом передаточного отношения между венцом маховика и шестерней привода), а направляющая втулка с якорем стартера в

это время вращается с частотой, соответствующей частоте холостого хода стартера.

Шестерня остаётся в зацеплении с венцом маховика до тех пор, пока водитель не отключит питание дополнительного реле. После размыкания контактов этого реле втягивающая и удерживающая обмотки тягового реле оказываются включёнными последовательно, получая питание от АБ через контакты *1К2*. Ввиду того что обе обмотки выполнены с одинаковым числом витков и ток во втягивающей обмотке после размыкания контакта *1К1* изменяет направление на противоположное, результирующая МДС обмоток и обусловленный её действием магнитный поток в зазоре между якорем и сердечником тягового реле становятся равными нулю. Реле отпускает, размыкая контакт *1К2* и отключая тем самым электродвигатель стартера от аккумуляторной батареи.

Реле блокировки стартера (см. рис. 2.4) предотвращает возможность включения стартера при работе двигателя и тем самым защищает вращающиеся элементы конструкции стартера от повреждений.

В более наглядном для ознакомления виде устройство стартера показано на рис. 2.7 [7]. Помимо чертежа общего вида стартера на этом рисунке показаны элементы подетальной разборки его электродвигателя и приводного устройства.

Массогабаритные показатели электростартеров зависят главным образом от их мощности и частоты вращения вала электродвигателя. Наиболее эффективным способом улучшения их является выполнение стартеров с более высоким передаточным числом привода, равным отношению числа зубьев венца маховика $Z_{\text{м}}$ к числу зубьев шестерни электростартера $Z_{\text{ш}}$ ($i = Z_{\text{м}}/Z_{\text{ш}}$), что обеспечивает возможность применения в них электродвигателей, выполненных на более высокие частоты вращения и имеющих вследствие этого меньшие размеры и массу (рис. 2.9, 2.10) [8].

Максимальное значение передаточного числа привода при передаче момента с расположенной на валу электродвигателя шестерни на коленчатый вал двигателя (при непосредственном приводе) ограничено, с одной стороны, условиями размещения маховика с большим числом зубьев (большого диаметра) на двигателе, а с другой — условиями выполнения шестерни с малым числом зубьев, обусловленными подрезанием зубьев и вследствие этого снижением их прочности. В большинстве стартеров с непосредственным приводом шестерня имеет 8—11 зубьев, а передаточное число от шестерни к венцу махо-

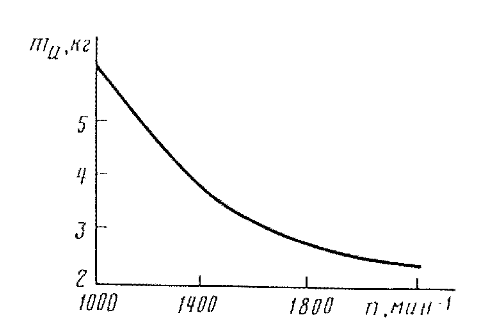


Рис. 2.9. **Зависимость массы активных материалов электродвигателя стартера с номинальной мощностью 1,4 кВт от расчетной номинальной частоты вращения**

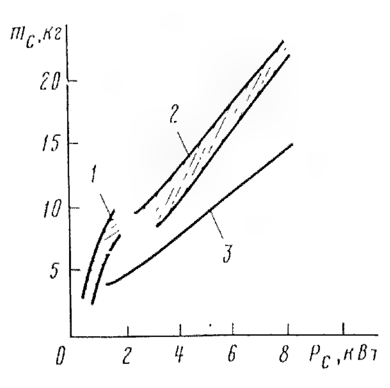


Рис. 2.10. Зависимость массы стартера от его номинальной мощности:
1 для карбюраторных ДВС; *2* для дизелей; *3* с редуктором для дизелей

вика лежит в пределах от 9 до 18. При этом номинальные частоты вращения стартеров (т.е. частоты, исходя из которых выбираются их размеры и определяются обмоточные данные) не выходят за пределы 950—2200 мин [5].

Для достижения более высоких значений передаточного отношения в привод стартеров между расположенной на его валу шестерней и венцом маховика встраиваются редукторы. Появление их в конструкции стартеров сопряжено с проявлением двух противоположных воздействий их на массогабаритные показатели стартеров. Одно из этих воздействий обусловлено самими редукторами и проявляется в возрастании массы и габаритов стартеров за счёт массы и габаритов редукторов, усложнением конструкции и технологии изготовления стартеров, увеличением потерь в приводном устройстве. Второе прямо противоположное воздействие на массогабаритные показатели стартеров со встроенными редукторами обусловлено применением в них высокоскоростных электродвигателей, имеющих значительное превосходство по массогабаритным показателям над электродвигателями с непосредственным приводом венца маховика. Помимо отмеченного положительного эффекта высокоскоростные электродвигатели вследствие свойственных им относительно небольших пусковых моментов выполняют функции своеобразных предохранителей аккумуляторных батарей от прохождения через них больших разрядных токов. Имеются и другие как положительные, так и отрицательные

моменты введения в конструкцию стартеров редукторов, но они не оказывают влияния на границы областей предпочтительного применения стартеров с непосредственным приводом венца маховика и приводом его через встроенный редуктор. Границы эти неоднозначны, однако, основываясь на данных, приведённых в отечественной и зарубежной литературе, можно заключить, что они лежат в пределах мощностей 1—2 кВт.

Конструктивно редукторы могут быть выполнены цилиндрическими с внешним (рис. 2.11) или внутренним (рис. 2.12) зацеплениями, а также планетарными (рис. 2.13). Наиболее перспективными являются планетарные редукторы.

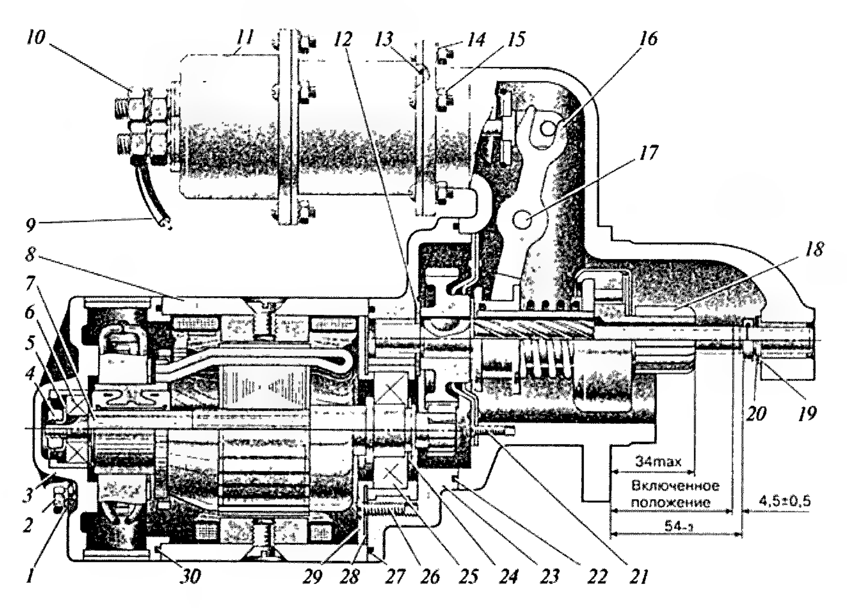


Рис. 2.11. Конструкция стартера со встроенным цилиндрическим редуктором с внешним зацеплением [1] :

1, *14* — пружинные шайбы; *2* — стяжной болт; *3* — крышка со стороны коллектора; *4*, *15* — гайки; *5* — шайба стопорная; *6*, *25* — шарикоподшипники; *7* — якорь в сборе; *8* — корпус в сборе; *9* — перемычка; *10* — гайка контактного болта тягового реле; *11* — тяговое реле; *12* — шайба; *13*, *22*, *27*, *30* — уплотнительные кольца; *16* — рычаг в сборе; *17* — ось рычага; *18* — шестерня привода; *19* — упорная шайба; *20* — регулировочная шайба; *21*, *26* — винты; *23* — корпус редуктора в сборе; *24* — кольцо; *28* — регулировочная прокладка; *29* — крышка подшипника

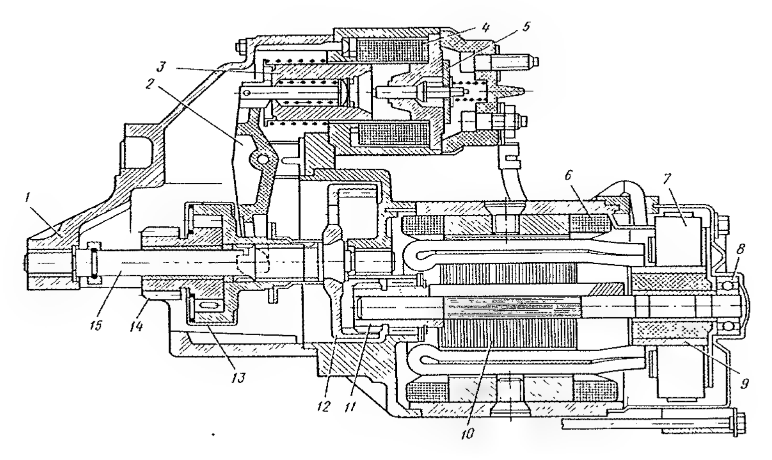


Рис. 2.12. Стартер с редуктором и внутренним зацеплением [8]:
1 — передняя крышка; *2* — приводной рычаг; *3* и *4* — соответственно якорь и обмотки тягового реле; *5* — контактный диск; *6* — обмотка возбуждения; *7* — щётка; *8* — подшипник; *9* — коллектор; *10* — якорь электродвигателя; *11* — ведущая шестерня редуктора; *12* — ведомое зубчатое колесо с внутренним зацеплением; *13* — роликовая муфта свободного хода; *14* — шестерня привода; *15* — вал привода

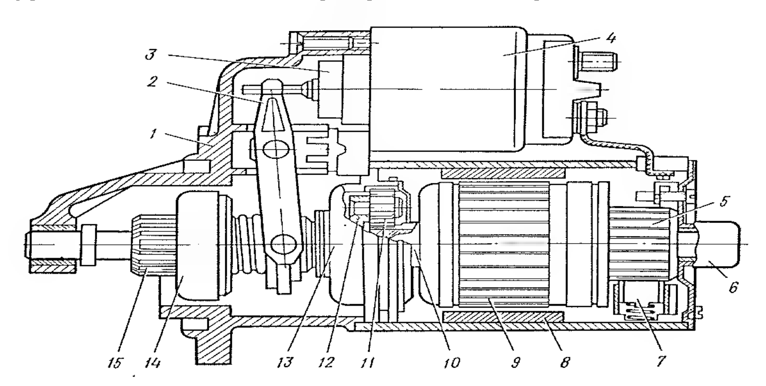


Рис. 2.13. Стартер с планетарным редуктором и возбуждением от постоянных магнитов [8]:
1 — передняя крышка; *2* — приводной рычаг; *3* —якорь тягового реле; *4* — тяговое реле; *5* — коллектор электродвигателя; *6* — корпус подшипника; *7* — щетка; *8* — постоянные магниты; *9* — якорь; *10* — первичный вал и ведущая шестерня редуктора; *11* — зубчатое колесо-сателлит; *12* — водило; *13* — неподвижное центральное зубчатое колесо с внутренним зацеплением; *14* — муфта свободного хода; *15* — шестерня привода

Преимуществом цилиндрического редуктора с внешним зацеплением является технологичность изготовления зубчатых колёс, недостатком — увеличение высоты стартера по сравнению со стартерами с непосредственным приводом из-за смещения осей стартерного электродвигателя и привода, а также появление радиальной нагрузки на вал электродвигателя, что приводит к необходимости применения радиальных подшипников.

В стартерах с внутренним зацеплением смещение осей электродвигателя и привода меньше, что облегчает установку стартера на двигателе. Недостатком этих стартеров является сложность изготовления зубчатых колёс и присутствие радиальной нагрузки на вал электродвигателя.

В стартерах с планетарными редукторами привод и электродвигатель расположены соосно, в связи с чем вал электродвигателя в них не испытывает радиальных нагрузок, что обеспечивает возможность применения для вала якоря подшипников качения. Важно также, что в случае применения в стартерах планетарных редукторов упрощается установка стартера на двигателе взамен редуктора с непосредственным приводом. Недостатком планетарных редукторов является сложность их изготовления.

В табл. 2.1 [5] приведены некоторые из практически значимых технических данных электростартеров зарубежных фирм с различными типами редукторов и различными системами возбуждения.

Электростартеры имеют, как правило, закрытое или герметизированное исполнение. Это исключает попадание в их внутреннее пространство грязи, воды, паров масла и других оказывающих вредное воздействие на работу и срок службы стартеров составляющих окружающей их среды. Герметизация стартеров обеспечивается установкой в местах разъёмов специальных резиновых колец, пластмассовых втулок и уплотнительных прокладок из мягких пластических материалов.

Таблица 2.1

Технические данные электростартеров зарубежных фирм

Фирма	Модель	$P_н$, кВт	D_j, мм	$m_{ст}$, кг	Возбуждение	Редуктор	Применение на двигателях с рабочим объемом, л	
							Бензиновых	Дизелях
Бош	DW1,4KW DW1,7KW EV2,2KW	1,7 2,4 3,2	80 80 93	3,6 4,4 6,1	ПМ ПМ ЭМ	Пл. Пл. Пл.	До 2 До 6 До 6	До 1,3 До 1,8 До 3,3

Фирма	Модель	$P_н$, кВт	D_j, мм	$m_{ст}$, кг	Воз-буж-дение	Редук-тор	Применение на двигателях с рабочим объемом, л	
							Бензино-вых	Дизелях
Валео	D6RA	1,1	64	2,75	ПМ	Пл.	До 3	До 3,3
	D9R	2,7	92	5,9	ЭМ	Внутр.	До 3	До 3
	D11R24V	7,5—9	115	17	ЭМ	Внутр.	До 3	9-16
Лукас	M78R1,4	1,5	78	3,5	ПМ	Пл.	До 2,8	До 1,6
	M80R1,7	1,7	80	4,4	ПМ	Пл.	До 3,6	До 2,3
	M100R2,8	2,8	103	8,5	ЭМ	Пл.	До 3,6	До 4
Магнети-	E70R-1,4KW	1,6	70	3,7	ЭМ	Пл.	1,6-2,7	До 1,3
Маралли	E95R-2,2KW	3,0	95	6,0	ЭМ	Пл.	1,6-2,72-	1,9-2,5
Хитачи	S114-25D	1,4	80	4,6	ЭМ	Внеш.	3	1—2
	S13-65	2,0	80	5,3	ЭМ	Внеш.	3—4	1—3
	S24-01	3,0	80	6,0	ЭМ	Внеш.	3—4	2,5—3,3
Денсо	02800-7560	1,1	68	3,8	ЭМ	Внеш.	3—4	2,5—3,3
	02800-8620	1,4	76	4,5	ЭМ	Внеш.	3—4	2,5—3,3
	02800-7791	2,0	76	5,6	ЭМ	Внеш.	3—4	2,5—3,3
	R2,2KW	2,2	88	5,9	ЭМ	Внеш.	3—4	2,5—3,3
	R2,5KW	2,6	90	8,5	ЭМ	Внеш.	3—4	2,5—3,3

Примечание. ПМ — постоянные магниты; ЭМ электромагнитное возбуждение; Пл. планетарный; Внутр. внутреннее зацепление; Внешн. внешнее зацепление.

2.3. Устройство, особенности работы и рабочие характеристики стартерных электродвигателей

2.3.1. Устройство стартерных электродвигателей

Электростартеры, используемые в настоящее время на автомобилях и тракторах, отличаются друг от друга в основном устройством и размещением в них элементов, расположенных за пределами активной части электродвигателей, а именно: тяговых реле, рычажных механизмов, связывающих тяговые реле с поводковыми муфтами, самих поводковых муфт, муфт свободного хода и устройств передачи момента от муфт свободного хода к венцу маховика. Что же касается собственно электродвигателей, то каких-либо принципиальных отличий в их устройстве нет. Исключением можно считать лишь ориентацию рабочей поверхности коллекторов в некоторых из электродвигателей стартеров не вдоль оси вала, а в плоскости перпендикулярной ей (торцевые коллекторы).

Все стартерные электродвигатели имеют традиционную для электрических машин постоянного тока конструкцию активной части, содержащую якорь с расположенным на одном валу и электрически

связанным с ним коллектором и размещённую на корпусе из магнитомягкого материала систему чередующихся по расточке полюсов, образованную обмотками возбуждения или постоянными магнитами. Применение для создания поля возбуждения постоянных магнитов признано целесообразным при мощностях электродвигателей 1—2 кВт. Особенно эффективно применение в стартерных электродвигателях высокоэнергетических сплавов постоянных магнитов на базе редкоземельных элементов (самария, неодима и других). Эти магниты при меньших по сравнению с электромагнитами радиальных размерах не только успешно противостоят размагничиванию их полем якоря в пусковом режиме, но и обеспечивают возможность реализации в электродвигателях бóльших значений электромагнитных нагрузок (за счёт отсутствия потерь на возбуждение), что в конечном счёте благоприятно сказывается на массогабаритных и энергетических показателях электродвигателей.

В результате всесторонних теоретических и экспериментальных исследований электростартерных систем пуска автотракторных двигателей определены наиболее удачные с точки зрения технико-экономических показателей варианты построения магнитной цепи электродвигателей.

Для гарантированного преодоления значительных моментов трогания автотракторных двигателей и сокращения времени их пуска стартерные электродвигатели выполняются преимущественно с последовательным или смешанным возбуждением. Введение в систему возбуждения параллельных обмоток позволяет уменьшить частоту вращения якоря при работе электродвигателя в режиме холостого хода и предотвратить тем самым возможные повреждения ротора вследствие механических перенапряжений. Катушки последовательной обмотки имеют небольшое число витков неизолированного медного провода прямоугольного сечения. В качестве межвитковой изоляции используется электрокартон толщиной 0,2—0,4 мм. Катушки параллельной обмотки возбуждения наматывают изолированным круглым проводом марок ПЭВ-2 и ПЭТВ.

Все автомобильные стартерные электродвигатели выполняются четырехполюсными. Сердечники полюсов и полюсные наконечники изготавливаются из профильной стали 10 и крепятся на корпусе винтами.

Якорь стартерных электродвигателей выполняется шихтованным из листов стали 0,8 кп или стали 10 толщиной 1—1,2 мм. Обмотка якоря во всех стартерных электродвигателях — простая волновая (рис. 2.14) размещена в полузакрытых или закрытых пазах прямо-

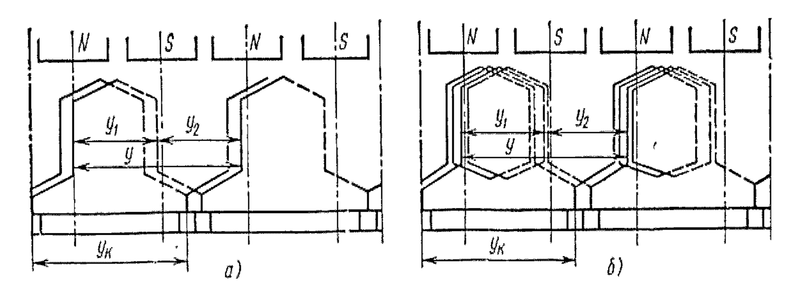


Рис. 2.14. Схемы волновых обмоток:
а — с одновитковыми секциями; *б* — с двухвитковыми секциями

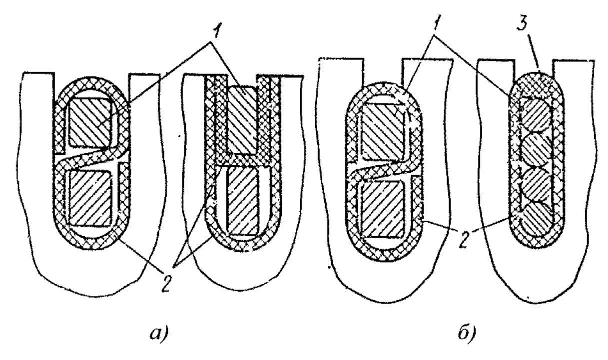


Рис. 2.15. Схемы пазов электростартеров:
а — открытые; *б* — полузакрытые; *1* — проводники обмотки якоря; *2* — изоляция пазов; *3* — клин

угольной или грушевидной формы и построена из одно- или двухвитковых секций, концы которых уложены в прорези «петушков» коллекторных пластин.

Пазы грушевидной формы применяют в стартерных электродвигателях малой мощности с двухвитковыми секциями, выполненными из круглого изолированного провода марок ПЭВ-2 или ПЭТВ. Прямоугольные пазы заполняются прямоугольным неизолированным проводом марки ПММ в два слоя. Для изоляции проводников в пазу друг от друга и от стенок паза используется электроизоляционный картон (рис. 2.15).

Конструктивные параметры якоря и обмоток возбуждения отечественных стартеров приведены в табл. 2.2 [7]. Коллекторы в автотракторных электростартерных электродвигателях выполняются сборными на металлической втулке с цилиндрической рабочей по-

Таблица 2.2

Конструктивные и обмоточные данные отечественных стартерных электродвигателей

Тип стартера	Якорь				Обмотка возбуждения					
	Диаметр, мм	Длина пакета, мм	Число пазов	Размеры провода, мм*	последовательная			параллельная		
					Число катушек	Число витков в катушке	Размеры провода, мм	Число катушек	Число витков в катушке	Диаметр провода, мм
СТ368	59	55	23	2	3	6	1,8×4,75	1	150	0,56
26.3708; 40.3708	60,3	42	23	2,24	3	5	1,8×4,75	1	150	0,56
СТ4-А1	59	57,6	23	1,8	3	7; 6,5; 6,5	1,4×4,75	1	135	0,56
СТ221	66,9	59,5	31	1,65×3,4	2	10	1,1×5,3	2	170	0,6
29.3708; 35.3708	66,95	49,5	31	1,65×3,4	3	5	2,24×5,3	1	170	0,6
42.3708; 421.3708	65	68	29	1,8×4,0	4	7	1,5×5,6	—	—	—
СТ2-А; СТ130- А3	47,3	74	29	2,24×3,55	2	9	1,4×5,6	2	68	1,8
СТ230-А1; -Б1; -Б3; -И; -К1; -Д; -Е; -Л	77,5	69	29	2,24×3,55	4	8,5	1,5×5,6	—	—	—
СТ402; СТ402-А; СТ402-Б	77,5	69	29	1,9	4	12	1×5,3	—	—	—
СТ142-Б; 30.3708	82,4	100	25	2,65×5,6	4	8	2,12×9	—	—	—
25.3708	94,4	115	27	3,28×6,4	4	8	2,12×12,5	—	—	—
25.3708-01	94,4	100	27	3,28×6,4	4	8	2,12×12,5	—	—	—
16.3708	109	115	27	4×8	2	4; 4,5	3,8×16,8	2	195	1,12

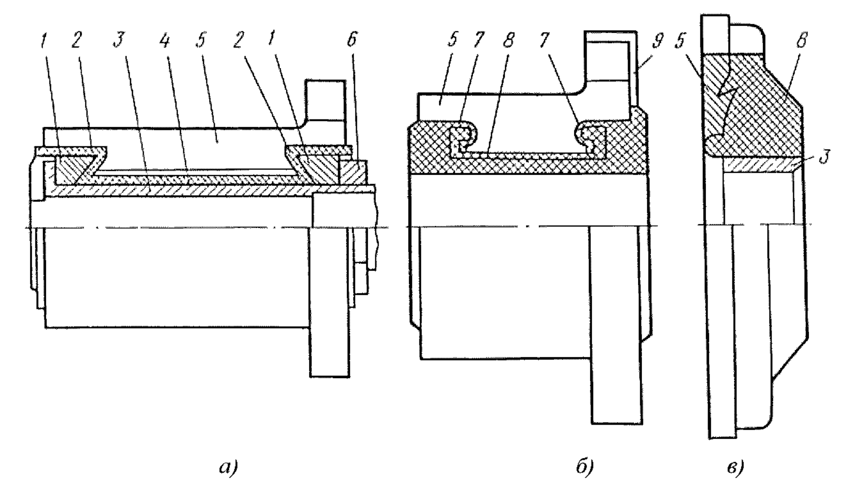


Рис. 2.16. Коллекторы электродвигателей стартеров:
а — сборный цилиндрический на металлической втулке; *б* — цилиндрический на пластмассовой основе; *в* — торцевой на пластмассовой основе; *1* и *2* — соответственно зажимные изоляционные конусные кольца; *3* — металлическая втулка; *4* — изоляционная трубка; *5* — пластины коллектора; *6* — гайка; *7* — армировочное кольцо; *8* — прессовочный изоляционный материал; *9* — изоляционная пластина

верхностью, а также на пластмассовой основе с цилиндрической и торцевой поверхностями (рис. 2.16) [9].

Пластины (ламели) коллекторов выполняются из меди. Для изоляции их друг от друга используют пластины из миканита, слюдопласта или слюдинита толщиной 0,6—0,9 мм. Цилиндрические коллекторы на пластмассовой основе применяются в стартерных электродвигателях мощностью до 3,5 кВт. В электродвигателях стартеров бóльшей мощности применяются сборные коллекторы на металлической втулке.

Торцевые коллекторы по сравнению с цилиндрическими коллекторами имеют меньшие размеры и металлоёмкость. Их применение способствует стабильной и длительной работе щёточного контакта. Они обладают высокой механической прочностью.

Для предохранения коллектора от разрушения при высоких частотах вращения якоря на тыльной поверхности ламелей расположены опорные выступы, которые опрессовывают прессовочным изоляционным материалом. Применение торцевых коллекторов позволяет уменьшить массу и габаритные размеры стартеров.

Надёжность работы и срок службы щёточно-коллекторного узла в значительной степени зависит от электрических и механических

свойств материала щёток, а также от удельного давления их на поверхность коллектора и от плотности тока в них.

В 12-вольтовых стартерных электродвигателях применяют медно-графитовые щётки марок МГСО, МГС-20, в 24-вольтовых применяют щётки МГС-5 и МГС-51. Щётки выполнены из сплава меди, графита, свинца и олова. Добавки свинца и олова способствуют улучшению коммутации, уменьшению износа коллектора и снижению падения напряжения под щётками. Размеры щёток (их сечение) выбираются по допустимой плотности тока в щёточном контакте. Применение волновой обмотки, имеющей при любом числе полюсов электродвигателя две параллельные ветви, позволяет ограничиться установкой на коллекторе двух щёток. Однако на большинстве электродвигателей стартеров отечественного и зарубежного производства устанавливают полное число щёточных узлов, что обеспечивает симметрию обеих ветвей обмотки якоря, уменьшение силы тока на щёткодержателе и длины коллектора.

Нормальные условия работы щёточно-коллекторного узла отечественных стартерных электродвигателей обеспечиваются при начальных усилиях 8—16 Н, испытываемых ими со стороны пружин.

2.3.2. Рабочие характеристики стартерных электродвигателей

Рабочими называют совокупность характеристик стартерных электродвигателей, определяющих их функциональные возможности, включая возможность и целесообразность применения их для систем пуска конкретных автотракторных двигателей. К числу таких характеристик относят зависимости напряжения, мощности, частоты вращения, момента и КПД электродвигателей от тока якоря и зависимость частоты вращения от момента сопротивления на валу электродвигателя.

Характер взаимосвязи между перечисленными электромеханическими параметрами электродвигателей и их численные значения зависят от способа создания в электродвигателях поля возбуждения (введёнными в цепь якоря последовательными обмотками возбуждения, параллельными обмотками возбуждении, совместным действием обеих этих обмоток, постоянными магнитами) и от всех тех факторов, которые определяют потери в электрических машинах (в меди, стали, механические и другие). Не менее значительное влияние на рабочие характеристики стартерных электродвигателей, во многом определяющее их отличие от рабочих характеристик электродвигателей посто-

янного тока общепромышленного и бытового применения, а также от электродвигателей, используемых в системах электрооборудования энергоёмких автономных объектов (самолётов, вертолётов и др.), оказывает совместная работа их с источником ограниченной мощности.

Ввиду сложного характера взаимосвязей между электромагнитными параметрами электродвигателей в условиях нелинейной магнитной цепи и трудностями определения в зависимости от этих параметров потерь в стали представить рабочие характеристики в наглядном, удобном для анализа и расчётов виде не представляется возможным. Можно получить лишь приближённые выражения для них в условиях линейной магнитной цепи и при отсутствии потерь в стали и механических потерь. При этих допущениях механические характеристики электродвигателя, полученные расчётным путём, отражают зависимости от частоты вращения электромагнитного момента и электромагнитной мощности, а не момента и мощности на валу двигателя. Для получения зависимости от частоты вращения момента и мощности на валу двигателя при наличии всех других рабочих характеристик необходимо в дополнение к ним иметь зависимость КПД от тока якоря.

На рис. 2.17 показано семейство рабочих характеристик электродвигателя стартера 35.3708, используемого в системах пуска двигателей автомобилей ВАЗ. Все приведённые на этом рисунке характеристики существенным образом зависят от ёмкости и степени заряженности аккумуляторной батареи и от температуры электролита. С уменьшением ёмкости АБ, степени её заряженности и температуры электролита возрастает внутреннее сопротивление батареи, вследствие чего увеличивается статизм вольт-амперной (внешней) характеристики АБ и, как следствие, этого сужается диапазон определения рабочих характеристик по току и уменьшаются их ординаты при тех же значениях тока якоря.

Для стартерных электродвигателей характерна работа в широком диапазоне температур окружающей среды, поэтому при оценке их эксплуатационных качеств принимаются во внимание рабочие характеристики, полученные при двух нормированных по температуре, степени разряженности (заряженности) аккумуляторной батареи и количеству отведённых на пуск двигателя попыток условиях — номинальных и пусковых. Номинальные условия характеризуются полностью заряженной АБ, температурой 25 °С и выходом двигателя на

самостоятельный режим работы при первой попытке пуска, а пусковые условия характеризуются состоянием АБ с начальной степенью

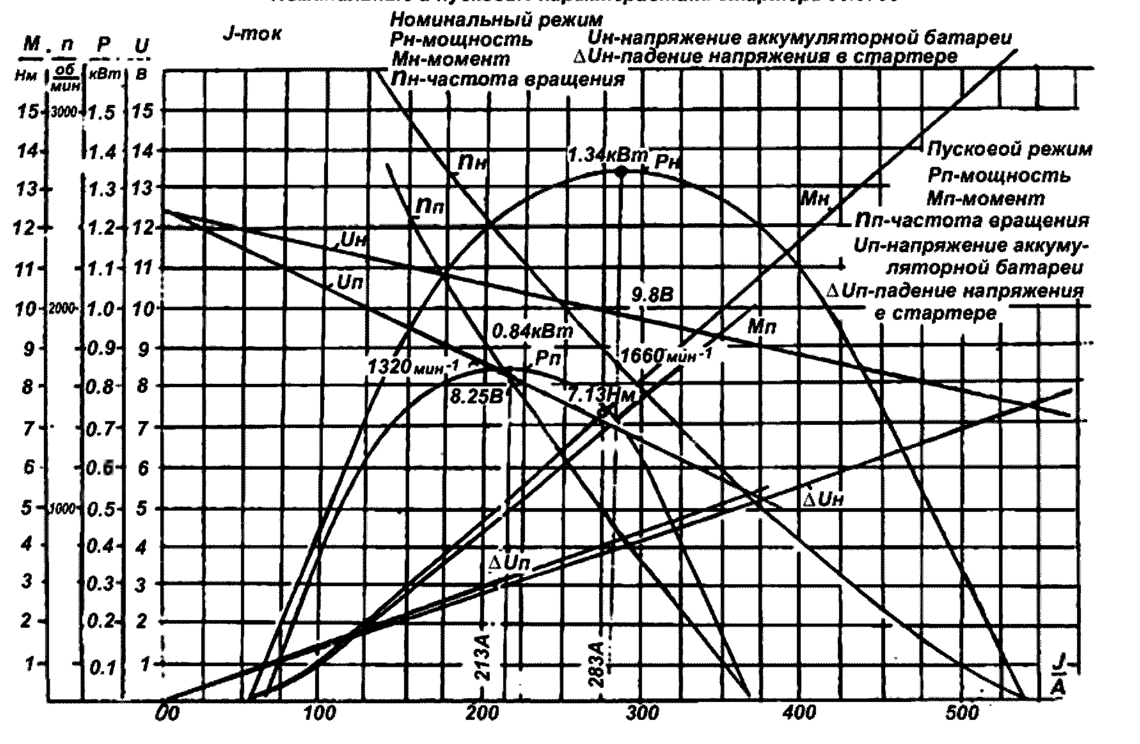


Рис. 2.17. Рабочие характеристики стартера 35.3708

разряженности 25 % на третьей попытке пуска и температурой 15 °С. При снятии рабочих характеристик при номинальных условиях зажимы стартерного электродвигателя подключаются непосредственно к клеммам АБ, а при снятии пусковых характеристик учитывается падение напряжения в стартерной цепи.

Энергетические возможности стартерных электродвигателей оцениваются по значениям их номинальных и пусковых мощностей. При этом за номинальную принимается наибольшая полезная мощность, кратковременно развиваемая стартерным электродвигателем при номинальных условиях, а за пусковую мощность — максимальную мощность, развиваемую им при пусковых условиях.

Пусковая мощность $P_{п}$ стартерных электродвигателей значительно меньше их номинальной мощности $P_{н}$. Применительно к электродвигателю стартера 35.3708 (см. рис. 2.17) пусковая мощность меньше номинальной в 1,6 раза. Столь же значительно при изменении условий с номинальных на пусковые уменьшается пусковой момент этого стартера (в 1,7 раза) и частота вращения его вала, соответствующая максимальной мощности (в два раза). Примерно в таком же соотношении находятся электромеханические параметры электродвигателей других стартеров.

Напряжение на зажимах стартерных электродвигателей при определении номинальной мощности рассчитывается по формуле [1]

$$U_{н} = E_{Б0} - I_{aн}R_{Б.н}, \qquad (2.7)$$

где $I_{aн}$ — номинальное значение тока якоря; $R_{Б.н}$ — нормированное значение омического сопротивления аккумуляторной батареи при работе электростартера в режиме максимально развиваемой им мощности:

$$R_{Б.н} = \alpha_{Б} E_{Б0} / C_{20}; \qquad (2.8)$$

C_{20} — ёмкость 20-часового разряда аккумуляторной батареи при испытании её на ёмкость; $\alpha_{Б}$ — коэффициент, значения которого зависят от типа аккумуляторной батареи и её ёмкости. Для батарей с $C_{20} < 100$ А·ч он принимается равным 0,05, а для батарей с $C_{20} > 100$ А·ч его значение равно 0,057. Для отечественных аккумуляторных батарей 6СТ-55ЭМ и 6СТ190 ТР рекомендуемые значения этого коэффициента равны соответственно 0,038 и 0,046 [5].

Разряд батарей при испытании на ёмкость 20-часового разряда проводят непрерывно током $I_{20} = 0{,}05\,C_{20}$ А до конечного разрядного напряжения на зажимах 5,25 В — у 6-вольтовых и 10,25 В — у 12-вольтовых батарей. Температура электролита при разряде поддерживается на уровне 18—27 °С.

Проектирование стартерных электродвигателей осуществляется с ориентацией на параметры пускового режима, соответствующие предельно низкой температуре для предполагаемого климатического района эксплуатации автомобиля, которая может отличаться от –15 °С.

Стартерные электродвигатели связаны с двигателями автомобилей исключительно механическими связями, поэтому динамика разгона автомобильных двигателей электростартером и параметры установившегося режима при их совместной работе (без отключения стартера при частоте вращения коленчатого вала, равной $n_{\min}$) определяются взаимным расположением их механических характеристик. При этом механическая характеристика электродвигателя стартера во всём диапазоне рабочих частот его вращения должна располагаться над механической характеристикой двигателя. Чем больше расстояние между этими характеристиками по оси моментов, тем меньше время пуска двигателя.

Определяющее влияние на характер взаимосвязи между моментом, развиваемым стартерным электродвигателем и частотой его вращения, оказывает способ создания в нём поля возбуждения. Это утверждение легко обосновать, сопоставив пусковые моменты и частоты вращения холостого хода электродвигателей последовательного и параллельного возбуждения, спроектированных на одни и те же исходные данные (одинаковые значения мощности, номинального напряжения, мощности, частоты вращения и др.) и одинаковые значения электромагнитных нагрузок и параметров, характеризующих геометрию полюсной системы. При принятых условиях проектирования размеры пакета якоря, длина воздушного зазора и МДС обмоток возбуждения, обеспечивающих реализацию выбранных значений электромагнитных нагрузок в обоих двигателях, получаются одинаковыми.

МДС последовательной (сериесной) обмотки $F_{\text{ов.с}} = I_a w_{\text{ов.с}}$ изменяется в функции момента сопротивления на валу электродвигателя $M_{\text{с.ср}}$ так же, как изменяется в функции него ток в обмотке якоря. Начиная с режима холостого хода вплоть до режима полного тормо-

жения, $F_{ов.с}$ увеличивается прямо пропорционально току. Что же касается развиваемого электродвигателем момента, то характер его изменения в функции тока зависит от степени влияния последнего на состояние магнитной цепи электродвигателя. Электромагнитные нагрузки при проектировании электродвигателей независимо от области их применения выбираются с таким расчётом, чтобы их магнитопровод в расчётном режиме был умеренно насыщен. В связи с этим при относительно небольших нагрузках, преодолеваемых электродвигателем, магнитное состояние его магнитопровода определяется линейной частью кривых намагничивания сталей, из которых он изготовлен. По этой причине магнитный поток в воздушном зазоре электродвигателя Φ_δ изменяется прямо пропорционально МДС сериесной обмотки, а электромагнитный момент $М_э$, прямо пропорциональный произведению этого потока на ток якоря I_a изменяется пропорционально квадрату тока (по параболе).

$$М_э = P_э/\omega = E_a I_a / 2\pi n = C_м \Phi_\delta I_a = К_\Phi I_a{}^2. \qquad (2.9)$$

В выражении (2.9) $P_э = E_a I_a$ — электромагнитная мощность; E_a — ЭДС якоря:

$$E_a = \frac{pN_a n \Phi_\delta}{60a}, \qquad (2.10)$$

где N_a — число проводников в обмотке якоря;

$$C_e = pN_a/60a;$$

$$C_м = c_e/2\pi.$$

В условиях ненасыщенной магнитной цепи электродвигателя последовательного возбуждения значения коэффициента $К_\Phi$ можно определить из выражения $К_\Phi = \Phi_\delta / I_a$ после следующих его преобразований

$$К_\Phi = \Phi_\delta / I_a = \Phi_\delta w_{ов.с1} / I_a w_{ов.с1} = (\Phi_\delta / F_{ов.с1}) w_{ов.с1} = \Lambda_\delta w_{ов.с1}, \qquad (2.11)$$

где $w_{ов.с1}$, $F_{ов.с1}$ — соответственно число витков в одной катушке сериесной обмотки и её МДС; Λ_δ — магнитная проводимость воздушного зазора:

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{\alpha_i \tau l_i}{\delta}, \qquad (2.12)$$

где α_i — расчётный коэффициент полюсного перекрытия; τ — полюсное деление; l_i — длина пакета якоря; δ — длина воздушного зазора.

По мере возрастания нагрузки сверх номинальной сталь магнитопровода электродвигателя переходит в сильно насыщенное состояние (прежде всего зубцы якоря). Магнитный поток в воздушном зазоре при возрастании тока поэтому практически не изменяется, и кривая электромагнитного момента в области токов, прилегающей к пусковому режиму, является фактически прямой линией.

Момент на валу электродвигателя М меньше электромагнитного момента $М_э$ на величину моментов сопротивления, обусловленных силами трения в подшипниках и щёточно-коллекторном узле, и момента, компенсирующего потери мощности на гистерезис и вихревые токи в стали магнитопровода. Затраты мощности на преодоление перечисленных моментов в практике проектирования стартерных электродвигателей учитывается ведением в число расчётных параметров так называемого электромагнитного КПД, равного отношению мощности на валу электродвигателя к электромагнитной его мощности. По усреднённой оценке значения этого коэффициента для стартерных электродвигателей в расчётном режиме лежат в пределах 0,85—0,96. Значения момента на валу электродвигателя поэтому $М = (0{,}85 \div 0{,}96)\ М_э$.

В электродвигателях параллельного возбуждения МДС обмотки возбуждения $F_{ов.ш}$ зависит от тока якоря не непосредственно, а через изменение напряжения на зажимах электродвигателя $U_{ст}$ (рис. 2.18):

$$F_{ов.ш} = U_{ст} / R_{ов.ш}, \qquad (2.13)$$

$R_{ов.ш}$ — сопротивление шунтовой обмотки.

При линейном изменении напряжения на клеммах АБ от тока

$$U_{ст} = E_{Б0} - I_a \left(R_Б + R_{пр} \right), \qquad (2.14)$$

где $R_Б$ — внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи; $R_{пр}$ — сопротивление стартерного провода и массы.

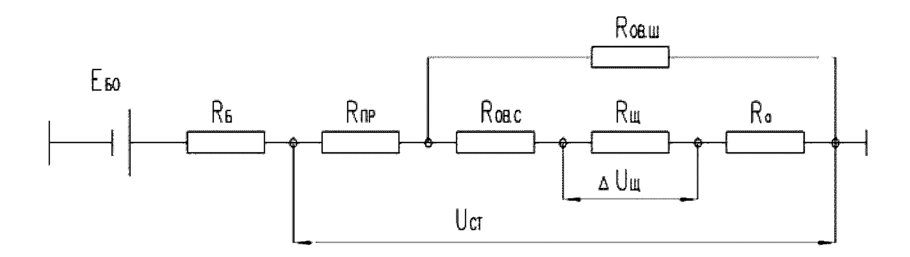


Рис. 2.18. Электрическая схема стартерной цепи

Таким образом, МДС обмотки возбуждения в электродвигателях параллельного возбуждения при увеличении нагрузки, начиная с режима холостого хода вплоть до режима полного торможения, уменьшается. Вследствие этого магнитный поток в воздушном зазоре этих двигателей в начальный момент пуска заметно меньше магнитного потока в воздушном зазоре электродвигателей последовательного возбуждения. Меньше и пусковой момент двигателей параллельного возбуждения, так как пусковые токи в них при принятом подходе к проектированию незначительно отличаются от пусковых токов в двигателях последовательного возбуждения.

Вторая характерная точка механической характеристики электродвигателя параллельного возбуждения, соответствующая их работе при отсутствии на их валу момента сопротивления ($M_{\text{с.ср}} = 0$) располагается на оси частот вращения ниже точки пересечения с этой осью механической характеристики двигателя последовательного возбуждения. В идеальном случае (при отсутствии потерь в стали и на трение в опорах)

$$n_{\text{о.ш}} = E_{\text{Б0}} / C_e \Phi_{\delta\,\text{о.ш}}\,, \tag{2.15}$$

$$n_{\text{о.с}} = E_{\text{Б0}} / C_e \Phi_{\delta\,\text{о.с}}\,.$$

Магнитный поток в воздушном зазоре двигателя параллельного возбуждения $\Phi_{\delta\,\text{о.ш}}$ при холостом ходе больше магнитного потока в воздушном зазоре, спроектированного на те же условия двигателя последовательного возбуждения $\Phi_{\delta\,\text{о.с}}$, поэтому $n_{\text{о.ш}} < n_{\text{о.с}}$.

Взаимное расположение механических характеристик электродвигателей стартеров с различными системами возбуждения, спроектированных на одни и те же исходные данные, показано на рис. 2.19.

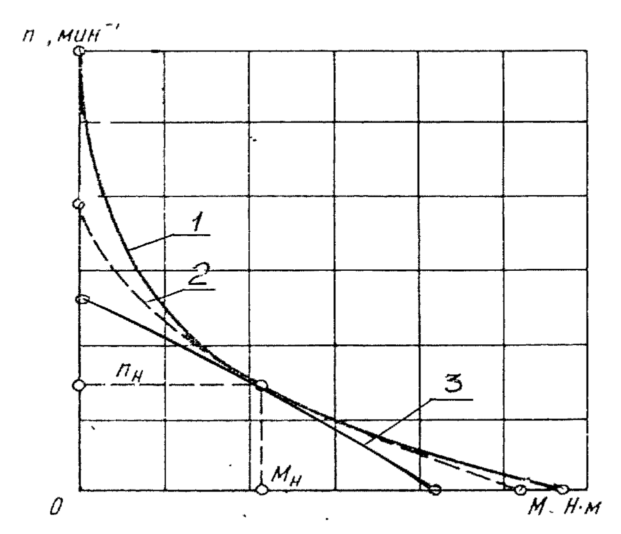


Рис. 2.19. Механические характеристики электродвигателей стартеров:
1 — с последовательным возбуждением; *2* — с смешанным возбуждением; *3* — с параллельным возбуждением

Ход механических характеристик в средней их части зависит от степени влияния нагрузки (тока якоря) на состояние магнитной цепи электродвигателя, т.е фактически от изменения в функции тока якоря коэффициента $К_Ф$. В электродвигателях последовательного возбуждения с ненасыщенной в средней части диапазона стартерных токов магнитной цепью значения коэффициента $К_Ф$ практически не изменяются при изменении тока и определяются выражением (2.11). При этих условиях электромагнитный момент связан с частотой вращения вала электродвигателя зависимостью

$$n = \frac{E_{Б0} - \Delta U_{щ}}{C_e \sqrt{К_Ф M / С_м}} - \frac{\sum R}{C_e К_Ф}. \quad (2.16)$$

Момент на валу электродвигателя при всех значениях частот вращения якоря меньше электромагнитного момента за счёт потерь в стали и механических потерь. Однако влияние указанных потерь на численные значения момента на валу M не столь велико, чтобы форма кривой $M_э(I_a)$ при пересчёте её в координаты $M(I_a)$ претерпела заметные изменения (рис. 2.20) [1].

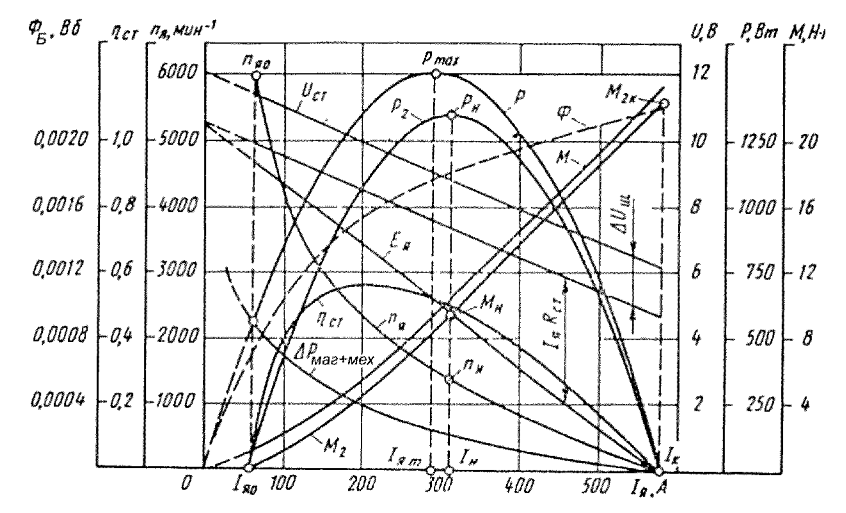


Рис. 2.20. Рабочие характеристики стартерного электродвигателя с последовательным возбуждением ($\Delta U_{щ}$ = const)

Работа электростартеров в системах электрооборудования автомобилей и тракторов ограничена временными рамками процесса пуска двигателя, когда единственным источником питания потребителей электроэнергией является аккумуляторная батарея. Энергетические возможности аккумуляторных батарей соизмеримы с энергопотреблением электростартеров за время пуска, поэтому напряжение на их зажимах и зажимах стартера в области токов, соответствующих максимально потребляемой стартерами мощности, заметно меньше расчётного значения ЭДС аккумуляторной батареи $E_{Б0}$, которое определяется по её расчётной вольт-амперной характеристике. Эта характеристика при анализе систем электростартерного пуска двигателей и при их проектировании представляется в виде прямой, включающей в себя спрямлённый участок реальной вольт-амперной характеристики аккумуляторной батареи (рис. 2.21). Ось токов эта прямая пересекает в точке, соответствующей режиму короткого замыкания.

Соотношение между максимальным значением мощности, которую способна отдать во внешнюю электрическую цепь аккумуляторная батарея $P_{Б\max}$, и максимальной мощностью, потребляемой стартером $P_{ст\max}$, можно определить из выражения

$$P_{ст} = P_{э} + \Delta P_{щ} + I_{ст}^2 R_{ст}, \qquad (2.17)$$

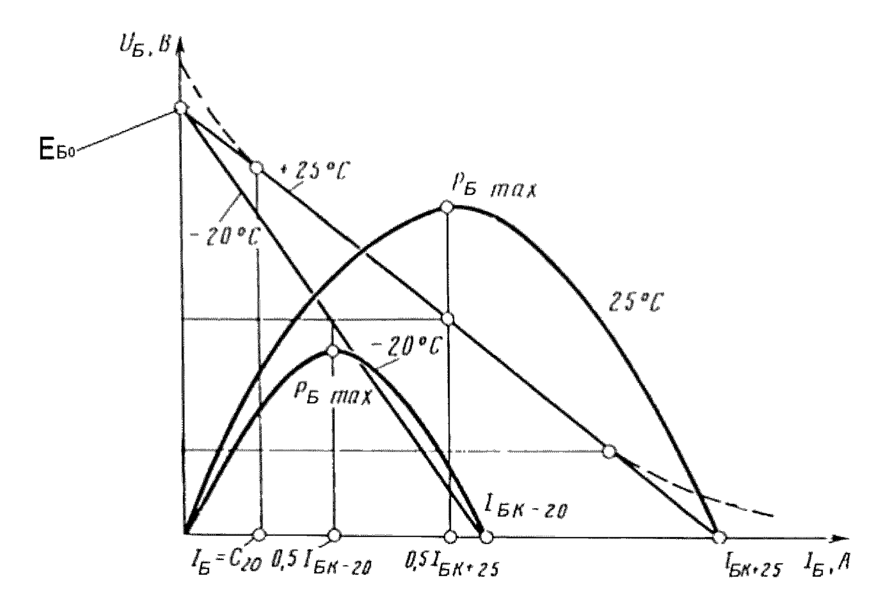


Рис. 2.21. Вольт-амперные и мощностные характеристики батареи при температурах ± 25 °С

где $P_э$ — электромагнитная мощность стартерного электродвигателя; $\Delta P_щ$ — потери мощности в щёточно-коллекторном узле; $I_{ст}$ — суммарный ток в обмотках электродвигателя (ток стартера); $R_{ст}$ — сопротивление обмоток электродвигателя.

$$P_э = E_a I_a; \tag{2.18}$$

$$\Delta P_щ = I_a U_щ; \tag{2.19}$$

$$R_{ст} = \frac{\left(R_a + R_{ов.с} + R_щ\right) R_{ов.ш}}{\left(R_a + R_{ов.с} + R_щ + R_{ов.ш}\right)}. \tag{2.20}$$

В приведённых выражениях $\Delta U_щ$, $R_{ов.с}$ и $R_щ$ соответственно падение напряжения под щётками, сопротивление последовательной (сериесной) обмотки возбуждения и переходное сопротивление контакта щётка — коллектор.

Ток стартера в электродвигателях последовательного возбуждения равен току в обмотках якоря и возбуждения. В электродвигателях

смешанного возбуждения он больше тока в якорной цепи на величину тока в шунтовой обмотке возбуждения:

$$I_{\text{ст}} = I_a + I_{\text{ов.ш}} = I_a \left(1 + I_{\text{ов.ш}} / I_a\right). \tag{2.21}$$

Отношение $I_{\text{ов.ш}} / I_a$ ввиду значительного сопротивления шунтовой обмотки возбуждения в большинстве выполненных электрических машинах, включая и электродвигатели автотракторных электростартеров, не превышает 5 % тока якоря. По этой причине в тех случаях, когда не ставится задача получения высокой точности конечных результатов, потребляемый электродвигателями смешанного возбуждения ток определяется без учёта присутствия в них параллельных обмоток возбуждения, т.е. считается, что суммарное сопротивление обмоток электродвигателя равно сумме сопротивлений обмотки якоря и сериесной обмотки возбуждения

$$R_{\text{ст}} = R_a + R_{\text{ов.с}}. \tag{2.22}$$

Индуктируемая в обмотке якоря ЭДС определяется из выражения

$$E_a = E_{\text{Б0}} - \Delta U_{\text{щ}} - I_a \sum R, \tag{2.23}$$

где $\sum R$ — сопротивление контура замыкания тока аккумуляторной батареи:

$$\sum R = R_{\text{Б}} + R_{\text{пр}} + R_{\text{ст}}, \tag{2.24}$$

где $R_{\text{пр}}$ — сопротивление стартерного провода и массы.

С учётом приведённых зависимостей

$$P_{\text{ст}} = E_{\text{Б0}} I_a - I_a^2 \left(R_{\text{Б}} + R_{\text{пр}}\right); \tag{2.25}$$

$$P_{\text{э}} = \left(E_{\text{Б0}} - \Delta U_{\text{щ}}\right) I_a - I_a^2 \sum R. \tag{2.26}$$

Согласно полученным зависимостям кривые, определяющие зависимости мощности, потребляемой стартером, и электромагнитной его мощности от тока якоря (от тока разряда аккумуляторной батареи), имеют максимумы, причём максимальных значений эти мощности достигают при разных токах разряда аккумуляторной батареи. Максимум потребляемой электростартером мощности

$$P_{\text{ст max}} = E_{\text{Б0}}^2 / 4\left(R_{\text{Б}} + R_{\text{пр}}\right) \tag{2.27}$$

имеет место при

$$I = E_{\text{Б0}} / 2\left(R_{\text{Б}} + R_{\text{пр}}\right), \tag{2.28}$$

а максимум электромагнитной его мощности

$$P_{\text{э}\max} = \left(E_{\text{Б0}} - \Delta U_{\text{щ}}\right) / 4\sum R \text{ —} \tag{2.29}$$

при

$$I_a = \left(E_{\text{Б0}} - \Delta U_{\text{щ}}\right) / 2\sum R\,, \tag{2.30}$$

т.е. при токе, вдвое меньшем пускового тока электродвигателя стартера

$$I_{\text{п}} = \left(E_{\text{Б0}} - \Delta U_{\text{щ}}\right) / \sum R\,. \tag{2.31}$$

Соотношение между максимальной мощностью, которую способна обеспечить на клеммах электродвигателя стартера аккумуляторная батарея, и максимальной мощностью, которую она поставляет к этим клеммам определяется из выражений

$$P_{\text{Б}\max} = E_{\text{Б0}}^2 / 4R_{\text{Б}}\,; \tag{2.32}$$

$$P_{\text{ст}\max} / P_{\text{Б}\max} = R_{\text{Б}} / \left(R_{\text{Б}} + R_{\text{пр}}\right). \tag{2.33}$$

Количественно оценить влияние входящих в это выражение сопротивлений на степень использования энергетических возможностей аккумуляторных батарей можно, воспользовавшись, например, приведёнными на рис. 2.22 кривыми, определяющими зависимость омического сопротивления стартерной аккумуляторной батареи 6СТ-90ЭМ от степени её заряженности при различных температурах [1].

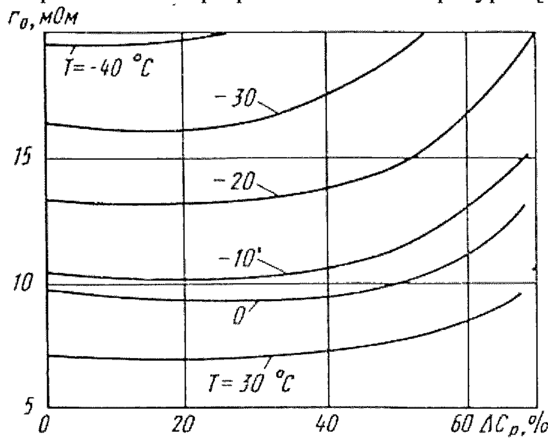


Рис. 2.22. Зависимость омического сопротивления аккумуляторной батареи 6СТ-90ЭМ от степени разряженности $\Delta C_{\text{р}}$ при различных температурах

При полностью заряженной батарее и температуре 30 °C её омическое сопротивление равно 0,007 Ом. Если принять сопротивление стартерных проводов наибольшим из рекомендуемых для них значений, равным 0,002 Ом, то согласно (2.32) максимальная мощность, поступление которой к клеммам стартерного электродвигателя может обеспечить указанная батарея, составляет 77 % максимального значения мощности, которую она могла бы обеспечить на этих клеммах при отсутствии сопротивления стартерных проводов. Применять в системах электростартерного пуска провода, сопротивление которых превышает рекомендуемые для них значения крайне нежелательно, так как это приводит к ещё более низкому использованию энергетических возможностей аккумуляторных батарей.

Если, например, уменьшить сечение стартерного провода в два раза, сохранив его длину, его сопротивление увеличится до 0,004 Ом, что приведёт к снижению использования энергетических возможностей батареи до 63 %.

Заслуживает внимания то обстоятельство, что при снижении температуры и обусловленного этим увеличением сопротивления батареи максимально потребляемая мощность стартером приближается к максимальной мощности аккумуляторной батареи. Так, например, при снижении температуры от +30 до –30 °C и соответствующем возрастании омического сопротивления батареи с 0,007 до 0,0164 Ом недоиспользование рассматриваемой батареи по мощности составляет всего лишь 11 %.

Однако это обстоятельство не означает увеличения энергопоступления к стартеру от аккумуляторной батареи. Наоборот, максимальная мощность, которую может развить стартерный электродвигатель при этой температуре уменьшается вследствие значительного увеличения статизма вольт-амперных характеристик аккумуляторной батареи (см. рис. 2.21) и соответствующего уменьшения максимального значения её мощности.

Главные размеры электрических машин определяются исходя из условия обеспечения электромагнитной мощности $P_э$, поэтому для рационального построения процесса проектирования стартерных электродвигателей важно наряду с выражением (2.27) иметь аналогичное выражение, определяющее соотношение между максимальными значениями электромагнитной мощности и мощности аккумуляторной батареи. Согласно (2.23) и (2.26)

$$P_{\text{э}\max}/P_{\text{Б}\max} = \left(1-\Delta U_{\text{щ}}/E_{\text{Б0}}\right)R_{\text{Б}}/\sum R; \tag{2.34}$$

$$R_{\text{Б}} = \left(0,6-0,7\right)\sum R. \tag{2.35}$$

В системах электростартерного пуска, спроектированных на минимум массы падение напряжения под щётками при работе стартера в расчётном режиме составляет $U = 1-1,5$ В. Подставив в выражение (2.34) $E = 12$ В, $U = 1,25$ В и $R_{\text{Б}}/\sum R = 0,65$, получим $P_{\text{э}\max}/P_{\text{Б}\max} =$ = 0,585. Полученный результат свидетельствует о том, что максимальное значение электрической энергии, которую поставляет аккумуляторная батарея в стартер для преобразования её в механическую энергию на валу электродвигателя без учёта механических потерь в нём потерь в стали магнитопровода, составляет в рассматриваемом случае не более 60 % максимальной мощности аккумуляторной батареи. Если учесть, что отношение мощности на валу электродвигателя к электромагнитной мощности лежит в пределах 0,85—0,96, то до вала доходит примерно 50 % максимальной мощности аккумуляторной батареи, и это только в том случае, если рабочая точка на характеристике $P_{\text{Б}}$ ($I_{\text{Б}}$) совпадает с точкой максимальной мощности.

Характер изменения основных электромеханических параметров от тока якоря, включая характер изменения от него электромагнитной мощности $P_{\text{э}}$ и электромагнитного момента $M_{\text{э}}$, механических по-

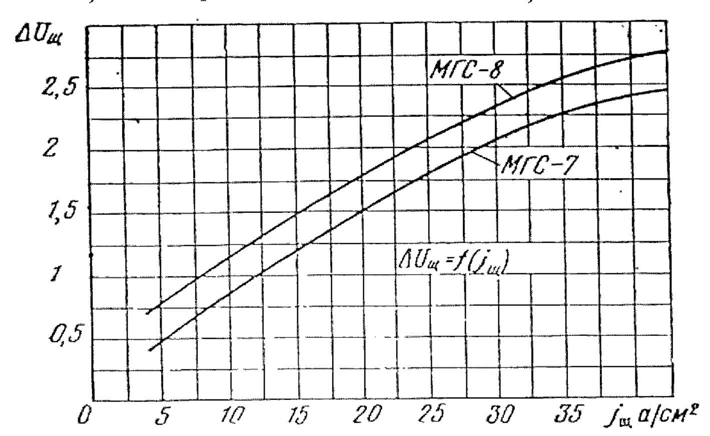


Рис. 2.23. Зависимость падения напряжения под щётками $\Delta U_{\text{щ}}$ от плотности тока $I_{\text{щ}}$

терь и потерь в стали и магнитного потока в воздушном зазоре Φ_δ можно оценить, проанализировав ход кривых, приведённых на рис. 2.20. При ознакомлении с указанными кривыми следует иметь в виду, что построены они при условии постоянства падения напряжения под щётками $\Delta U_{щ}$ во всём диапазоне изменения тока якоря. В реальных условиях $\Delta U_{щ}$ при изменении режима работы электродвигателя изменяется (рис. 2.23), что, естественно, оказывает влияние на рабочие характеристики. Особенно заметно оно проявляется в области токов, соответствующих восходящей ветви кривой $P(I_a)$.

2.4. Оценка пригодности стартерных электродвигателей для применения в системах пуска автотракторных двигателей

Оценка возможности и целесообразности применения электростартеров для пуска конкретных автотракторных двигателей проводится по результатам совместного решения представленных в графическом виде уравнений механических характеристик стартера, приведённых к коленчатому валу двигателя, и механических характеристик двигателя (рис. 2.24 и 2.25).

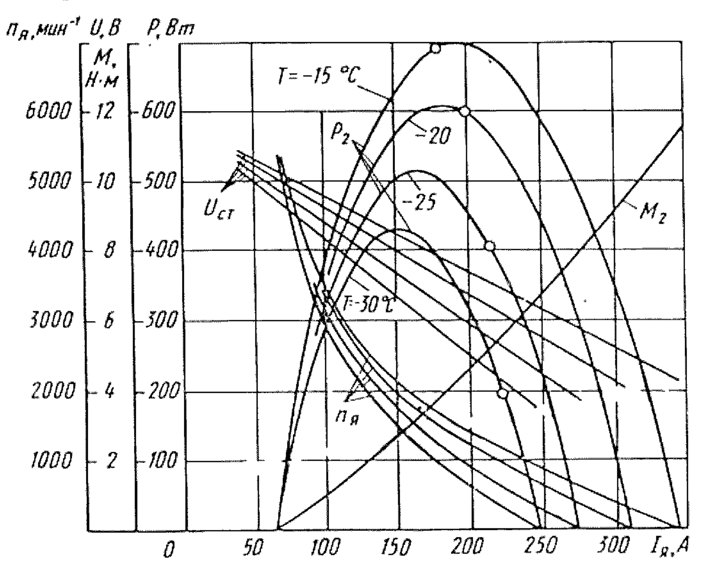
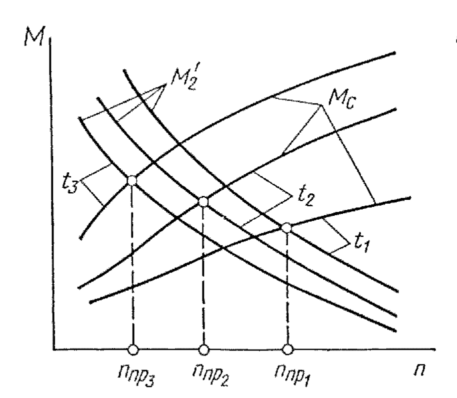


Рис. 2.24. Рабочие характеристики стартерного электродвигателя при различных температурах



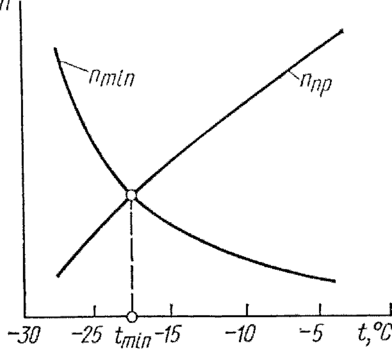


Рис. 2.25. Совмещенные механические характеристики стартера и двигателя внутреннего сгорания ($t_1 > t_2 > t_3$)

Рис. 2.26. Определение предельной температуры пуска двигателя внутреннего сгорания

Координаты точек пересечения $M_{с.ср}(n)$ и $M_{ст}(n)$, построенных для нескольких значений температур, включая предельные по условиям эксплуатации конкретного транспортного средства их значения, определяют установившиеся значения передаваемого стартером на коленчатый вал двигателя момента и частоты вращения коленчатого вала, соответствующие каждой из принятых при построении характеристик температур.

По условию работоспособности двигателя установившееся значение частоты вращения его коленчатого вала при предельно низкой температуре эксплуатации должна быть больше минимальной по условию пуска частоты вращения при этой температуре ($n_{дв} > n_{min}$). Предельную температуру пуска можно определить, совместив в одной системе координат зависимости минимальной частоты вращения двигателя от температуры $n_{дв\ min}(t)$ (рис. 2.26) с зависимостью от температуры установившегося значения частоты вращения коленчатого вала $n_{дв}(t)$, построенную по координатам точек пересечения кривых, построенных на рис. 2.24. Температура, соответствующая точке пересечения этих кривых является предельной температурой пуска двигателя конкретным электростартером.

Если определённая таким образом предельная температура пуска выше предельной температуры эксплуатации двигателя, то подобранная для него система пуска не отвечает требованию его работоспособности и её следует заменить системой с электродвигателем большей мощности.

С точки зрения массогабаритных и энергетических показателей системы электростартерного пуска желательно при её компановке обеспечить работу стартерного электродвигателя в точке максимума развиваемой им мощности и при максимальном КПД системы. Добиться выполнения этих условий в рамках одной и той же системы пуска практически невозможно. Приблизиться же к совместному их выполнению можно путём соответствующего подбора передаточного отношения от коленчатого вала двигателя к валу электродвигателя стартера

Контрольные вопросы

1. Каковы назначение, состав и функциональные связи между элементами систем электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания.
2. Назовите параметры, характеризующие эксплуатационные качества СЭП. Каково соотношение между минимальной частотой пуска двигателя и установившейся частотой вращения коленчатого вала при неработающей системе зажигания (впрыска топлива)?
3. Что понимается под надёжным пуском двигателя и предельной температурой пуска?
4. Как изменяются минимальная пусковая частота и момент сопротивления двигателя от температуры?
5. Как определяются для конкретных СЭП минимальная частота и предельная температура пуска двигателя?
6. Расскажите об особенностях конструкции стартерных электродвигателей.
7. Обоснуйте целесообразность применения в СЭП электродвигателей последовательного возбуждения.
8. Какие преимущества обеспечивает применение в стартерных электродвигателях для создания поля возбуждения постоянных магнитов?
9. С какой целью в систему возбуждения стартерных электродвигателей вводятся параллельные обмотки возбуждения?
10. Какие факторы принимаются во внимание при выборе передаточного отношения редуктора стартера?
11. Обоснуйте необходимость применения в системе передачи момента от электродвигателя стартера к коленчатому валу двигателя муфт свободного хода.
12. Перечислите особенности работы электродвигателей в СЭП двигателей автотранспортных средств.
13. Каковы электромеханические характеристики стартерных электродвигателей в номинальном и пусковом режимах. Сравните результаты их анализа.
14. Какие режимы работы стартерных электродвигателей принимаются за расчётные при их проектировании?
15. Перечислите наиболее вероятные неисправности СЭП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чижков Ю.П.** Электрооборудование автомобилей / Ю.П. Чижков, С.В. Акимов. М.: За рулем, 1999.
2. **Сугробов А.М.** Проектирование электромашинных генераторов для систем электрооборудования автономных объектов / А.М. Сугробов. М.: Издательство МЭИ, 2005.
3. **Вентильные** генераторы автономных систем электроснабжения / Н.М. Рожнов, А.М. Русаков, А.М. Сугробов, П.А. Тыричев; под ред. П.А. Тыричева. М.: Издательство МЭИ, 1996.
4. **Балагуров В.А.** Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В.А. Балагуров. М.: Высш. шк., 1982.
5. **Квайт С.М.** Пусковые качества и системы пуска автомобильных двигателей / С.М. Квайт, Я.А. Менделевич, Ю.П. Чижков. М.: Машиностроение, 1990.
6. **Акимов С.В.** Электрическое и электронное оборудование автомобилей / С.В. Акимов, Ю.И. Боровских, Ю.П. Чижков. М.: Машиностроение, 1988.
7. **Электрооборудование** автомобилей / А.В. Акимов, О.А. Акимов, С.В. Акимов и др.; под ред. Ю.П. Чижкова. М.: Транспорт, 1993.
8. **Ютт В.Е.** Электрооборудование автомобилей / В.Е. Ютт. М.: Транспорт, 1995.
9. **Теория,** конструкция и расчет автотракторного электрооборудования / Л.В. Копылова, В.И. Коротков, В.Е. Красильников и др.; под ред. М.Н. Фесенко. М.: Машиностроение, 1980.
10. **Микросхемы** для импульсных источников питания и их применение. — 2-е изд., испр и доп. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2001.
11. **Интеллектуальные** системы электроснабжения автотранспортных средств / А.Е. Чернов, А.М. Сугробов // Грузовик. 2010. № 4.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

Сугробов Анатолий Михайлович,
Берилов Андрей Вячеславович,
Грузков Сергей Александрович,
Станкевич Иван Владимирович

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ

Учебное пособие
по курсам
«Электрооборудование автомобилей и тракторов»
и «Проектирование электрооборудования
автомобилей и тракторов»
для студентов, обучающихся по направлению
140600 «Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»

Редактор Г.Ф. Раджабова

Темплан издания МЭИ 2010, учебн.		Подписано к печати 11.05.11
Печать офсетная	Формат бумаги 60×84/16	Физ. печ. л. 6,0
Тираж 316 экз.	Изд. № 109	Заказ

ЗАО «Издательский дом МЭИ», 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
Отпечатано в типографии ФКП «НИИ «Геодезия», 141292, Московская обл.,
г. Красноармейск, просп. Испытателей, д. 14